INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2022 · nº 553 · 6,50 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INFORME ESPECIAL

ENIGMAS DEL FONDO MARINO

Nuevos hallazgos en las profundidades oceánicas

ASTRONOMÍA Más allá del modelo cosmológico estándar

EPIGENÉTICA La herencia de los traumas psicológicos

BIOLOGÍA El lado oscuro de la nomenclatura científica

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES

FOTOGRAFÍA DE PORTADA: YUNG-SEN WU

APUNTES



Las imágenes captadas con cámara ultralenta indican que el picamadero no amortigua los golpes para proteger su cerebro.

INAKI RELANZON/MINDEN PICTURES

BIOMECÁNICA

LOS GOLPES DEL PÁJARO CARPINTERO

Su cabeza no absorbe los impactos, a diferencia de la de algunos crustáceos

El picamadero, o pájaro carpintero, pasa el día golpeando los troncos de los árboles con el pico para abrir agujeros en busca de insectos que comer. Su inconfundible repiqueteo ha llevado a los naturalistas y estudiosos a suponer que el hueso que separa el pico del cerebro amortiguaría de alguna forma los impactos con objeto de evitar una conmoción cerebral. Un nuevo estudio indica, en cambio, que la cabeza y el pico actúan como un martillo rígido, sin amortiguación alguna, pues eso restaría eficacia a la percusión del pico.

«Si se pasa el día horadando agujeros en la madera, tiene que ser eficiente en la tarea, es muy importante», explica Sam Van Wassenbergh, especialista en biomecánica evolutiva de la Universidad de Amberes, que ha dirigido el estudio. Si el picamadero absorbiese parte de la energía que dirige contra el tronco, la fuerza que ejercería sobre la madera sería menor y tendría que picar más fuerte para abrir el agujero. «Cuanto más rumia uno sobre el asunto, menos sentido tiene un mecanismo amortiguador. Pero había que demostrarlo», añade Van Wassenbergh.

En el nuevo estudio, publicado en *Current Biology*, los autores analizaron grabaciones de vídeo de tres especies de picamaderos para seguir el movimiento de distintas partes de la cabeza en el curso del impacto contra la madera. En lugar de observar una deceleración más lenta de la caja craneana que del pico (lo que indicaría amortiguación), comprobaron que la cabeza actuaba como un martillo con escasa o nula atenuación de las vibraciones.

En algunos trabajos de la década de 1970 se abordaba la cuestión del cráneo del picamadero desde un punto de vista teórico. Pero, hasta el presente estudio, nunca se habían usado antes grabaciones a cámara (ultra)lenta para calcular la cantidad de fuerza acumulada en el pico, en la cabeza o, de forma separada, en el cerebro, señala el neurobiólogo Daniel Tobiansky, que estudia también este pájaro en el Colegio de Saint Mary de Maryland pero no participó en el estudio.

¿Cómo evita, pues, el traumatismo cerebral? Los autores recurrieron a simulaciones para calcular el impacto sobre el cerebro y lo compararon con los valores de las fuerzas que causan conmoción en el ser humano. Puesto que el cerebro del picamadero es mucho más pequeño que el humano, la presión que soporta con el impacto súbito resulta mucho menor que en nuestro caso, puntualiza Van Wassenbergh. Según los modelos, las fuerzas que soporta el cerebro del pájaro están dos veces por debajo del límite de peligro. Así que «puede picar más fuerte contra el árbol sin quedar conmocionado», concluye.

Aun así, Tobiansky señala que, entre los jugadores de fútbol americano con lesiones cerebrales, la encefalopatía traumática crónica resulta más frecuente en los delanteros que han recibido repetidamente golpes fuertes que no provocan conmoción. Incluso los choques que no causan conmoción dañan el cerebro, por lo que es posible que el picamadero precise de algún tipo de protección fisiológica. El trabajo de Tobiansky y sus colaboradores apunta a que las hormonas esteroideas, como los andrógenos y los estrógenos, contribuirían a proteger su cerebro.

En definitiva, la caja craneana del picamadero no sería una buena fuente de inspiración para diseñar un casco. Y aquí es donde hace acto de presencia el cangrejo pistola *Alpheus heterochaelis*, que los especialistas consideran un mejor candidato en este aspecto.

El rasgo distintivo de este pequeño crustáceo costero es la posesión de una pinza desmesurada que, como animal territorial que es, esgrime contra los intrusos que invaden su hogar. La pinza está dotada de un mecanismo de cerrojo que dispara una prominencia a modo de émbolo en el seno de una cavidad. La entrada fulminante del émbolo provoca la salida de un chorro de agua que, debido a la baja presión generada, se evapora y deja en su lugar una burbuja de aire; es esta la que al reventar genera el chasquido e, incluso, una fugaz centella. Pero el principal resultado del chasquido es una onda de presión de gran amplitud. Cuando dos cangrejos se enzarzan,

chasquean la pinza a un centímetro escaso del oponente, con el propósito de intimidarse en un verdadero duelo hidráulico. Las ondas de presión que se generan pueden infligir lesiones cerebrales.

Recientemente, en *Current Biology* se ha desvelado el secreto del cangrejo pistola para resistir las acometidas: una suerte de máscara transparente, llamada capucha orbital, que cubre los ojos y protege el cerebro de las ondas de presión.

«Los trabajos versados en la evolución de las armas se cuentan por miles, pero no hay tantos que aborden la cuestión de cómo defenderse contra ellas», asegura Melissa Hughes, que estudia este cangrejo pistola en el Colegio de Charleston en Carolina del Sur, pero no ha formado parte del estudio. En este caso, la pregunta reviste especial interés porque el chasquido puede dañar tanto al adversario como al propio artífice. «Así que se necesita una protección doble: frente al ataque de otros cangrejos y frente a la propia arma», explica.

Los autores del artículo observaron que, cuando se extirpan las capuchas orbitales, el cangrejo expuesto a las ondas de choque se desorienta y pierde el control motor de las extremidades, a veces de forma permanente, un indicador de daño cerebral. Los ejemplares intactos muestran un comportamiento normal. La medición de la presión dentro y fuera de las capuchas por medio de sensores diminutos indica que, en promedio, reducen la fuerza de las ondas de choque a la mitad. «El "casco" del cangrejo amortigua con bastante eficacia las ondas, así que el cerebro situado debajo no soporta tanta fuerza», aclara Alexandra Kingston, bióloga de la Universidad de Tulsa y autora principal del estudio.

Investigaciones posteriores sugieren que la onda de choque expulsa el agua por el fondo de la capucha y la energía transferida al líquido se disipa lejos del animal, en lugar de propagarse a través de su cuerpo.

Conocer el funcionamiento de esos cascos diminutos podría inspirar el diseño de equipos de protección contra los traumatismos cerebrales, como los generados por las ondas de choque, afirman los investigadores. El picamadero y el cangrejo pistola «afrontan a diario el riesgo de lesión cerebral», opina Daniel Speiser, ecólogo visual de la Universidad de Carolina del Sur y otro de los autores del estudio. Los investigadores esperan que los mecanismos fisiológicos y biomecánicos de los que se sirven para proteger el cerebro inspiren nuevas soluciones médicas o de ingeniería que eviten los daños cerebrales.

Viviane Callier

ECOLOGÍA

AVISPONES SERVICIALES

THOMAS FUCHS

Las plantas avisan a los depredadores para que rescaten sus semillas

En cuanto un avispón percibe una señal química de alarma de un árbol *Aquilaria*, vuela raudo hacia él y revolotea esperando devorar algunas orugas, como de costumbre. Pero una vez en el lugar, no encuentra ninguna y ha de conformarse con algunas semillas, que el insecto engañado se lleva consigo, ayudando involuntariamente a propagar el árbol. En un nuevo estudio publicado en *Current Biology* se afirma que este es el primer caso conocido en el mundo vegetal del uso de sustancias químicas defensivas con el fin de diseminar las semillas.

Aquilaria sinensis es una especie propia de la China tropical. Cuando las orugas comienzan a devorar sus hojas, activa un medio de defensa presente en muchas plantas: libera una serie de compuestos volátiles estimulados por la herbivoría (HIPV, por sus siglas en inglés), con el fin de atraer a los depredadores hambrientos. «La mayoría de los vegetales dispone de HIPV», explica Jessamyn Manson, ecólogo en la Universidad de Virginia, que no ha formado parte de esta nueva investigación.

En el estudio se ha demostrado por medio de análisis químicos y experimentos de campo que el fruto de la *Aquilaria* segrega compuestos que forman parte de los HIPV aunque el árbol no esté siendo atacado por orugas. De esa forma atrae con rapidez a varios tipos de avispones, que se alimentan de unos apéndices suculentos y nutritivos de las semillas, los eleosomas. El avispón suele desechar la semilla cerca del avispero, en zonas ensombrecidas donde puede germinar sin desecarse. Si quedase expuesta a los rayos del sol, la semilla moriría en cuestión de horas.

El estudio arroja luz sobre un fenómeno poco estudiado. «No se ha prestado la debida atención a la dispersión rápida de las semillas», asegura uno de los autores del estudio, Gang Wang, ecólogo del Jardín Botánico Tropical Xishuangbanna de la Academia China de Ciencias. La entomocoria de los avispones permanece inédita en gran parte. Se calcula que las hormigas, parientes de los anteriores, esparcen las semillas de más de 11.000 plantas, pero los ejemplos comprobados en el caso de los avispones son muy pocos.

Los resultados del estudio también repercuten en la esfera de la conservación, pues los habitantes de la región comen las larvas de avispón y usan con fines medicinales *Aquilaria*, un árbol amenazado por la regresión del hábitat. «La conservación de estos árboles va ligada a la de los avispones», opina Wang. Manson está de acuerdo: «No podemos limitarnos a proteger una planta y cruzar los dedos. Hemos de conocer bien la comunidad donde habita», concluye.

Darren Incorvaia

MEDIOAMBIENTE

CONECTIVIDAD ECOLÓGICA

Un mapa global de los movimientos de los mamíferos entre áreas protegidas revela cuán conectadas están las reservas naturales

Para encontrar nuevas parejas y fuentes de alimento, los mamíferos salvajes a menudo deben aventurarse entre áreas protegidas. Los conservacionistas llevan tiempo pidiendo que se designen «corredores ecológicos» para facilitar y hacer más seguros sus desplazamientos. Sin embargo, hasta ahora no se conocía bien la ubicación de las rutas más importantes y si las condiciones que imperan en ellas favorecen o dificultan tales viajes.

Un reciente estudio publicado en *Science* revela que dos tercios de las sendas más transitadas continúan desprotegidas. Según los autores, reducir ciertas presiones humanas podría resultar más eficaz para potenciar las conexiones que aumentar la superficie preservada entre las reservas actuales.

Los científicos examinaron datos sobre los movimientos de 624 individuos pertenecientes a 48 especies de mamíferos, desde jaguares en Sudamérica hasta jirafas en África, y emplearon un método denominado teoría de circuitos para crear un mapa global de las rutas entre áreas protegidas. La mayor parte de los trabajos previos se limitaban a analizar si esas áreas estaban conectadas, pero el nuevo estudio también se ocupó de las condiciones a lo largo de las rutas seguidas por los mamíferos, incluidas aquellas que atravesaban terrenos de uso residencial, agrícola, pecuario o forestal.

El equipo evaluó si las áreas protegidas estaban bien conectadas o aisladas unas de otras, una información que podría servir a los gestores del suelo para salvaguardar a los mamíferos amenazados por la pérdida y degradación del hábitat. «Debemos mantener esas poblaciones y asegurarnos de que las reservas naturales no se conviertan en islas en mitad de un mar de usos humanos del suelo», sentencia Angela Brennan, científica conservacionista de la Universidad de la Columbia Británica y primera autora del artículo.

Los autores hallaron que reducir a la mitad la huella humana en una región, adoptando medidas como disminuir el uso agrícola o integrar árboles y arbustos en los pastos, aumentaría la conec-

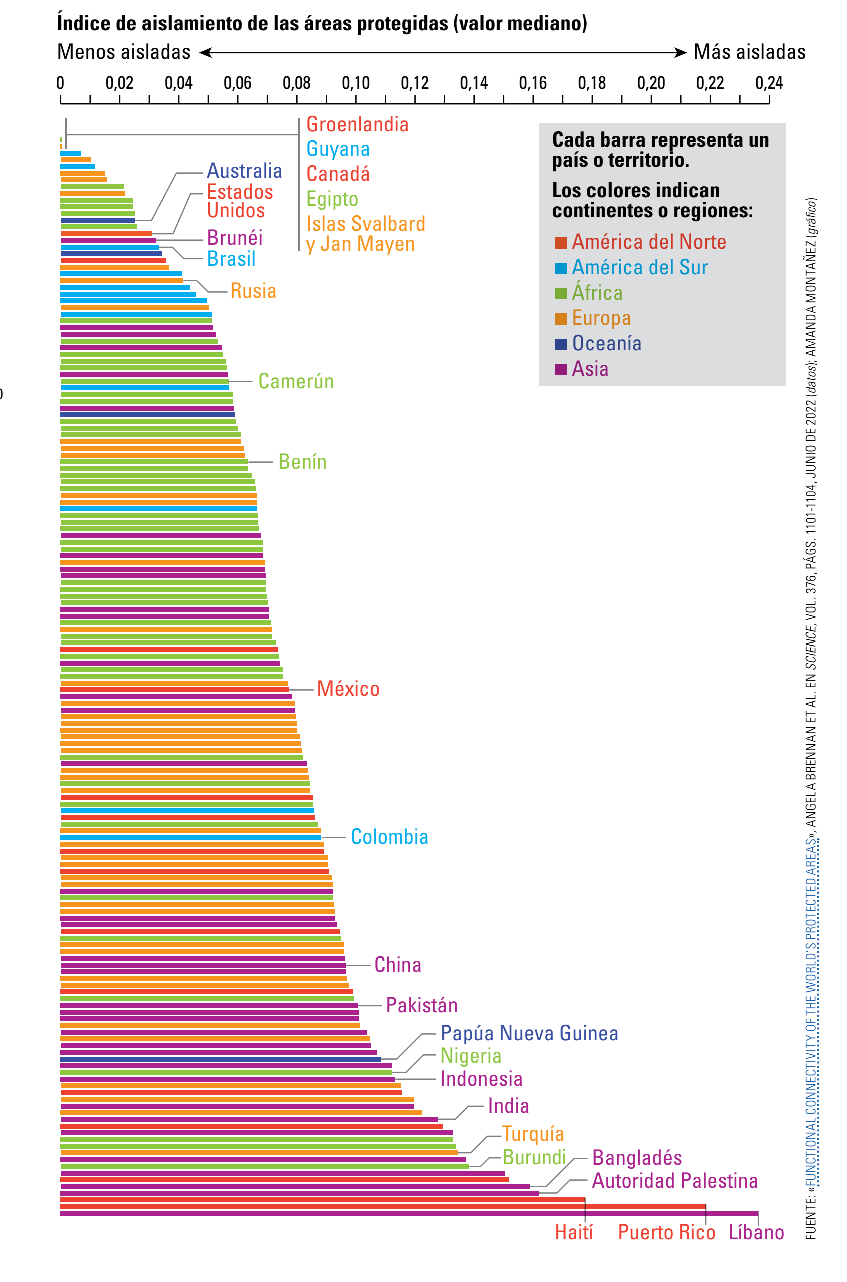
tividad (en promedio) en un 28 por ciento. Por otro lado, si se preservara un 50 por ciento más de territorio, el incremento ascendería al 12 por ciento. Y adoptar ambas estrategias podría elevar la conectividad de las áreas protegidas en un 43 por ciento.

El estudio emplea «datos reales y potentes métodos analíticos para ayudarnos a entender la conectividad», valora Nick Haddad, ecólogo de la Universidad Estatal de Míchigan que no participó en el trabajo. «Con solo mejorar los terrenos existentes, aunque estén ocupados por personas, y hacerlos más accesibles para los animales, ya se lograría aumentar las conexiones entre áreas protegidas.»

Susan Cosier

Conectividad por países

La medición del aislamiento de las áreas protegidas (AAP) de cada país o territorio revela patrones regionales e irregularidades. En general, África posee una conectividad bastante alta en comparación con Europa, por ejemplo. Sin embargo, algunas naciones de la misma región o bioma presentan valores de AAP muy distintos. Así, las áreas protegidas de Nigeria están mucho más desconectadas que las de sus vecinos Benín o Camerún. Y aunque los países asiáticos presentan algunos de los valores de AAP más elevados, ciertos casos atípicos (como Brunéi, donde gran parte del territorio está protegido) ofrecen abundantes conexiones para los mamíferos migratorios.



ESPECIES INVASORAS

LIMPIADOR DE RESTOS CERÁMICOS

Un pez invasor podría servir para filtrar aguas residuales

Los «peces diablo», también llamados «plecos», son peces loricáridos originarios de Sudamérica, pero se han extendido a otros cuatro continentes. Estos invasores de agua dulce desplazan a las especies autóctonas y devoran sus huevos, e incluso causan perjuicios al sector pesquero. Sin embargo, en un artículo publicado en *Scientific Reports*, un equipo de investigadores de México asegura que estos nocivos animales podrían tener una utilidad inesperada: la pasta formada al triturar su carne serviría para filtrar las aguas residuales de la industria cerámica.

Solo el sector de las baldosas produce al menos 16.000 millones de metros cuadrados de cerámica al año. Las fábricas emplean grandes cantidades de agua potable, y un sistema de limpieza biológico como el propuesto permitiría reutilizar esa agua en vez de drenarla.

El colágeno de los tejidos conjuntivos de esos peces, combinado con una sal rica en hierro, actúa como coagulante: la mezcla desestabiliza las partículas de los compuestos residuales, de manera que estas se agrupan en flóculos, grumos de mayor tamaño que pueden separarse por decantación o filtración. Los científicos hallaron que ese proceso eliminaba el 94 por ciento de los sólidos presentes en las aguas residuales de la industria cerámica y reducía en un 79 por ciento un indicador de la materia orgánica disuelta en el agua. Los autores afirman que su mezcla piscícola es menos tóxica que otros coagulantes disponibles, lo cual es relevante, puesto que esa toxicidad disuade a algunos fabricantes de tratar los residuos cerámicos.

«Los restos cerámicos casi siempre se dejan secar al sol, y el lodo resultante se desecha o se emplea como material de relleno», explica Miguel Mauricio Aguilera Flores, científico ambiental del Instituto Politécnico Nacional de México y director del estudio. «La gente recela de reutilizar el agua en cualquiera de sus actividades por temor a la toxicidad de los coagulantes químicos actuales, así que ese recurso hídrico se pierde.»

La mezcla es sencilla de preparar, pero Aguilera Flores señala que la obtención de suficiente biomasa podría ser un factor limitante para su uso industrial. La captura de peces diablo silvestres lograría satisfacer una demanda modesta, añade. Sin embargo, para aumentar la capacidad, tal vez habría que acabar criándolos... eso sí, extremando las precauciones.

«La gestión de los efluentes de cualquier actividad industrial es una cuestión importante, y el sector cerámico no constituye una excepción», valora Eileen De Guire, directora de contenido técnico y comunicaciones de la Sociedad Americana de Cerámica. «Aprovechar una especie invasora parece una forma creativa de usar un problema relacionado con los residuos para solucionar otro.»

Gary Hartley



AMAN VERMA/GETTY IMAGES

MATERIALES

PEGAMENTO A BASE DE MUÉRDAGO

El parásito navideño produce un potente adhesivo biológico


NIGEL CATTLIN/MINDEN PICTURES

Muchos de nosotros asociamos el muérdago con los besos navideños. Sin embargo, durante siglos, esta planta parásita fue más conocida por su extraordinaria adherencia. Así, los antiguos griegos y romanos empleaban las viscosas bayas del muérdago en diversas aplicaciones, desde trampas para pájaros hasta ungüentos para las úlceras de la piel. Ahora, los bioquímicos están investigando si las propiedades adherentes del muérdago podrían ofrecer una alternativa natural a los pegamentos sintéticos.

La viscosidad resulta esencial para esta planta, cuyas bayas contienen semillas recubiertas de una sustancia mucosa llamada viscina. Tras engullir y digerir los frutos, los pájaros excretan las semillas enredadas en los hilos de esta sustancia, de modo que al caer se quedan enganchadas a las ramas de los árboles. Entonces el muérdago se arraiga en el árbol y comienza a extraer agua y nutrientes de su anfitrión.

Con el fin de determinar por qué es tan fuerte este adhesivo natural, Matt Harrington, biólogo químico de la Universidad McGill, y dos colaboradores del Instituto Max Planck de Coloides e Interfases de Potsdam recogieron plantas de muérdago que crecían en manzanos de Alemania. Con la ayuda de unas pinzas, extrajeron las fibras de viscina de las bayas para examinarlas con más detalle.

En un estudio publicado en *PNAS Nexus*, el equipo señala que la estructura de la viscina es lo que la distingue de otros adhesivos. Mientras que muchos pegamentos sintéticos empiezan como un «charco» de sustancias viscosas, la viscina está compuesta por fibras de celulosa que le aportan firmeza. Estas fibras poseen un recubrimiento sensible a la humedad que permite que la sustancia sea sumamente maleable: en condiciones húmedas, un hilo de viscina de medio centímetro de largo puede estirarse hasta alcanzar una longitud de más de dos metros. Al secarse, la sustancia se endurece como el cemento. «Esa naturaleza multifuncional y que responde a la humedad es lo que más me asombró», comenta Harrington.

Los investigadores hallaron que la viscina es resistente, llegando a soportar pesos 50 veces mayores que los de las semillas de muérdago, y muy versátil. Está adaptada para adherirse a la corteza de los árboles y a las plumas, pero se pega a casi cualquier cosa, incluida la piel. (Mojarse las manos no elimina la viscina, explica Harrington, pero al frotarlas se genera suficiente calor y humedad para que se desprenda.)

Los autores afirman que la viscina podría servir como agente biodegradable para cerrar heridas recientes. La probaron en una pieza de cerdo procedente de una carnicería local, en la que practicaron varios tajos. Una vez que se secó, la sustancia mantenía los cortes sellados aunque se aplicara fuerza.

Según Juliann Aukema, investigadora del Servicio Forestal de EE.UU. que estudia la ecología del muérdago y no participó en el estudio, esta alternativa a los pegamentos sintéticos derivados del petróleo podría hacer que la planta recuperase su antigua importancia. «Sabíamos muchas cosas sobre el muérdago que se han perdido», lamenta Aukema. «Y ahora, en 2022, estamos volviendo a aprenderlas.»

Jack Tamisiea

BIOLOGÍA

ALAS DE POLILLAS ILUMINADAS

La luz infrarroja revela el esplendor oculto de las alas y ayuda a identificar las especies

Los colores pardos y grises de las polillas no cautivan nuestra imaginación como lo hace la viva librea de las cercanas mariposas, pero según un estudio reciente, eso responde más a la capacidad visual del ojo humano que a las propias polillas.

Al fotografiar las escamas alares de 82 polillas pertenecientes a 26 especies con una cámara que capta un segmento adicional del espectro lumínico, el infrarrojo, los investigadores contemplaron estos lepidópteros con un nuevo prisma. El ojo humano no capta la luz infrarroja porque su longitud de onda es demasiado larga, pero en esa parte del espectro los tonos parduzcos que estamos habituados a ver cuando las polillas aletean se tornan vibrantes colores iridiscentes, según describen en el *Journal of the Royal Society Interface.*



El lado izquierdo de estas polillas muestra los colores visibles al natural y el derecho expone el realce observado con la luz infrarroja.

DE: «POTENTIAL FOR IDENTIFICATION OF WILD NIGHT-FLYING MOTHS BY REMOTE INFRARED MICROSCOPY», MENG LI ET AL. EN *JOURNAL OF THE ROYAL SOCIETY INTERFACE*, VOL. 19, JUNIO DE 2022.

Aparte de exponer esa belleza, los nuevos datos también revelaron diferencias estructurales propias de cada especie en el modo en que las alas reflejan y dispersan la luz infrarroja. La diversidad de esas señas lumínicas, que tienen su origen en las escamas microscópicas que recubren las alas, podría ayudar a reconocer cada especie con el lídar (acrónimo inglés de detección y telemetría mediante luz), un instrumento que emite y capta la luz infrarroja.

El radar acústico ya se emplea para censar las polillas en campo abierto. Pero esos rasgos específicos de cada tipo de polilla tal vez facilitarían el seguimiento de sus variables migraciones nocturnas, momento en que sirven como importante fuente de alimento para las aves y otros animales.

El entomólogo y especialista en teledetección por radar Alistair Drake, de la Universidad de Nueva Gales, en Australia, destaca las posibles limitaciones del lídar en el seguimiento de las polillas. «El inconveniente del lídar reside en la estrechez del haz», explica en calidad de observador externo. Los haces de radar con que se detectan los insectos en vuelo tienen entre 18 y 30 metros de ancho, suficiente para captar el paso de muchísimos individuos; en contraste, el haz del lídar apenas alcanza escasos centímetros, algo así como la envergadura de un solo ejemplar de esfíngido. «Así que no sabemos si seremos capaces de apuntar el haz vertical con el tino suficiente para detectar bastantes polillas en vuelo.»

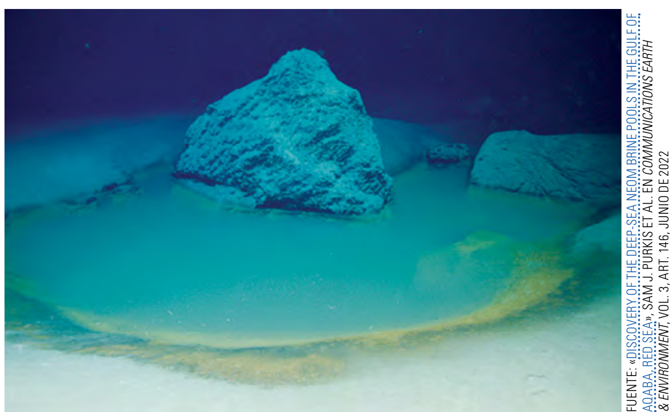
Con el fin de poner a prueba el método de detección propuesto, la autora principal del estudio, Meng Li, óptica especialista en instrumentos de teledetección entomológica en la Universidad de Lund, y su equipo están evaluando la capacidad del lídar para detectar las especies de polillas que frecuentan el lugar de estudio. «Desde abril, llevamos haciendo rastreos con el radar, el lídar y una trampa, de modo que, si se produce una gran migración de alguna especie, quedará reflejada en los tres», explica.

Daniel Lingenhöhl y Sasha Warren

SEDIMENTOS EN SALMUERA

Un lago hipersalino situado en el fondo del mar Rojo conserva registros prístinos de antiguos desastres

Una piscina de salmuera constituye una extraña anomalía de la naturaleza. Se trata de una masa de agua tan llena de sal que no se mezcla con el agua marina circundante y forma un «lago» bien delimitado en el fondo del océano, un entorno tóxico en el que pocos organismos sobreviven. Ahora, en un brazo del mar Rojo, se ha descubierto una de estas singulares piscinas, en la que se han conservado sedimentos que revelan una historia milenaria de inundaciones repentinas, tsunamis y terremotos.



Una pequeña piscina de salmuera en el golfo de Áqaba.

FUENTE: «DISCOVERY OF THE DEEP-SEA NEOM BRINE POOLS IN THE GULF OF AQABA, RED SEA», SAM J. PURKIS ET AL. EN *COMMUNICATIONS EARTH & ENVIRONMENT*, VOL. 3, ART. 146, JUNIO DE 2022

Las piscinas de salmuera se forman en lugares donde un mar quedó aislado de otros océanos en el pasado remoto y, al evaporarse, dejó depósitos de sal bajo la superficie. La que se acaba de descubrir está en el golfo de Áqaba, entre Arabia Saudí y Egipto, y es la más cercana a la costa de todas las que se conocen en el mar Rojo. Dado que se halla a menos de dos kilómetros de tierra firme, ha atrapado sedimentos del litoral durante siglos, y su salinidad, hostil a la vida, previene las perturbaciones biológicas.

«Las capas sedimentarias depositadas en el fondo de la salmuera se encuentran en un estado de conservación excepcional», señala Sam Purkis, geólogo marino de la Universidad de Miami. «No hay nada que las altere.»

Purkis y sus colaboradores descubrieron el lago submarino en 2020, durante una expedición dirigida por la organización sin ánimo de lucro OceanX y por medio de un vehículo operado por control remoto. El agua salobre recuerda a una bruma espectral, perfilada por una capa de microorganismos halófilos (amantes de la sal) que bordea el perímetro de la piscina. Pese a su carácter inhóspito, las gambas y las anguilas merodean en torno al agua hipersalina, con el fin de capturar las pequeñas criaturas que se aventuran en ella y quedan aturdidas por la salmuera.

Las perforaciones ya han revelado sedimentos con una antigüedad de hasta 1200 años en el fondo de la piscina. «Representa la memoria de las experiencias de esa región», comenta Beverly Goodman Tchernov, geocientífica marina de la Universidad de Haifa ajena al estudio.

Las capas de sedimentos incluyen depósitos de fango y limo procedentes de los tempestuosos ríos que discurren por los *uadis* (cauces secos) del desierto durante la temporada de lluvias, una vez cada cuarto de siglo. Una de las capas, que data de hace unos 500 años, podría corresponder a un corrimiento de tierra submarino del que Purkis y su equipo ya habían descubierto vestigios en el mar Rojo.

El equipo también halló sedimentos gruesos que seguramente fueron transportados por tsunamis. Una capa reciente quizás esté relacionada con un terremoto de magnitud 7,2 ocurrido en 1995, que provocó olas de 4 metros en una ciudad portuaria egipcia. El examen de los sedimentos sugiere que los terremotos o corrimientos de tierra podrían producir tsunamis similares más o menos cada 100 años, sostienen los investigadores en *Communications Earth & Environment*.

La costa norte del mar Rojo no se encuentra muy poblada, señala Goodman Tchernov, pero eso está cambiando rápidamente. Purkis ha aprovechado sus hallazgos sobre los lagos de salmuera para exponer a las autoridades de Arabia Saudí los riesgos geológicos de construir en esa región. «La clave», concluye, «radica en la toma de conciencia y la planificación».

Stephanie Pappas

PALEONTOLOGÍA

EL PULGAR DEL PANDA

Caminar a cuatro patas limitó el desarrollo del «sexto dedo» de los osos panda



SHARON FISHER/MUSEO DE HISTORIA NATURAL DEL CONDADO DE LOS ÁNGELES

Un oso que vagaba hace unos seis millones de años por lo que hoy es China constituye el antepasado más antiguo conocido del panda que ya se alimentaba de bambú. Además, poseía los mismos falsos pulgares regordetes que sobresalen de las muñecas de los pandas actuales, junto a sus cinco dedos. Los fósiles de la nueva especie sugieren que esos «pulgares», que ayudaban a los animales a asir el bambú y a arrancar su corteza, conservaron su peculiar forma para facilitar la locomoción cuadrúpeda del animal.

Dichos fósiles, descubiertos en la provincia de Yunnan y descritos en *Scientific Reports*, también retrasan la fecha en la que los ancestros de los pandas habrían pasado de comer carne a mascar bambú: esa transición no se habría producido hace dos millones de años, sino hace seis. «Abandonar la dieta carnívora supuso cambiar una vida inestable por el apacible consumo del abundante bambú», expone Xiaoming Wang, paleontólogo del Museo de Historia Natural del Condado de Los Ángeles y primer autor del estudio. «No fue un mal negocio.»

Aunque los fósiles exhumados en la cuenca de Zhaotong solo incluían dientes y algunos huesos de las extremidades, poseían rasgos distintivos que permitieron a Wang y sus colegas asociarlos a un miembro temprano del linaje del panda, del género extinto *Ailurarctos*. Entre los restos destaca un hueso de la muñeca, dotado de un protopulgar. «Su forma es muy parecida a la que observamos en el panda actual», señala Juan Abella Pérez, investigador del Instituto Catalán de Paleontología Miquel Crusafont que no participó en el estudio.

¿Por qué esa protuberancia ósea no evolucionó hasta convertirse en un falso pulgar más largo con el que sujetar mejor la comida? Los investigadores creen que el hecho de caminar a cuatro patas supuso la principal limitación: un pulgar de mayor tamaño, argumentan Wang y sus colegas, habría afectado al movimiento del panda o incrementado el riesgo de fractura. Los falsos pulgares no podrían haberse vuelto más grandes y complejos sin que los osos se tornaran bípedos o lograran, de algún otro modo, que los apéndices no les estorbasen. En cierto sentido, eso hace que la evolución del pulgar del panda resulte aún más impactante. La singular estructura se veía condicionada tanto por la necesidad de desplazarse como por la de comer, así que representa un «término medio evolutivo» más que una estructura ideal para asir largas cañas de bambú.

Riley Black

GENÉTICA

ONCOLOGÍA ASISTIDA POR ELEFANTES

Un importante gen antitumoral mantiene a raya el cáncer en este gran mamífero

THOMAS FUCHS

En ciencia se la conoce como la paradoja de Peto: el cáncer tiene su origen en las mutaciones genéticas que se van acumulando con el tiempo en las células, pero los grandes animales longevos, que poseen muchísimas células, como los elefantes y las ballenas, sufren esta enfermedad muy raramente. ¿Por qué?

Por lo menos en el caso de los paquidermos, parte de la respuesta quizá resida en el gen *p53*, que en el ser humano y en otros muchos animales interviene en la reparación del ADN dañado en el curso de la replicación. Los elefantes poseen una cantidad asombrosa de este gen: 20 copias. Todas ellas, cada una con dos variantes o alelos, producen en total 40 proteínas, en contraste con la única copia de la especie humana y de la mayoría de los animales, que solo produce un par de proteínas.

Una nueva investigación publicada en *Molecular Biology and Evolution* ahonda en el modo en que las numerosas copias del elefante ofrecen ventajas a la hora de combatir el cáncer. El trabajo «abre multitud de posibilidades nuevas en el estudio de los mecanismos celulares de protección antitumoral contra los daños del genoma, tanto en el elefante como en el ser humano», afirma Robin Fåhraeus, coautor del estudio y oncólogo molecular en el Instituto Nacional de Sanidad e Investigación Médica de Francia.

El gen *p53* desempeña un cometido esencial en los mamíferos, puesto que evita que las células mutadas acaben deviniendo tumores: deja en suspenso la replicación e inicia, bien la reparación, o bien la autodestrucción celular si el daño es excesivo. Sin la intervención del *p53*, el cáncer toma el control con facilidad: en más de la mitad de los tumores humanos, el gen ha cesado de funcionar a causa de mutaciones al azar.

El equipo modelizó y examinó cuarenta proteínas *p53* de elefantes antes de descubrir dos modos en que el gen ayudaría a burlar el cáncer en estos mamíferos. El primero es que el hecho de poseer varias copias reduce las posibilidades de que el *p53* deje de funcionar por mutaciones. Además, las copias elefantinas se activan como respuesta a diversos desencadenantes moleculares; por lo tanto, reaccionan de distintas maneras a las células dañadas, lo que probablemente conceda un margen a la hora de detectar y erradicar las mutaciones.

De esos resultados «notables» se deduce que los elefantes disponen de varias formas para desplegar el gen *p53*, afirma Sue Haupt, bióloga celular en el Centro Oncológico Peter MacCallum de Australia, que no ha participado en la investigación. Un hecho que apunta a «posibilidades interesantes en el estudio de nuevas estrategias antitumorales en el ser humano», añade.

Fåhraeus y sus colaboradores siguen tirando del hilo de esos resultados con las muestras de sangre extraídas a un elefante asiático del zoo de Viena. Investigan el modo en que las proteínas p53 del paquidermo interaccionan con las células dañadas y con otras moléculas clave, y planean comparar los resultados con los obtenidos en células humanas. «Con su baja incidencia de cáncer, los elefantes se han convertido en un sorprendente recurso de la investigación oncológica, que nos permitirá conocer más a fondo la respuesta innata de las células ante los daños de su ADN. Es, pues, una publicación importante», concluye Virginia Pearson, viróloga del Centro Oncológico Fox Chase y ajena al estudio.

Rachel Nuwer

LA IMAGEN DEL MES

LOS MINERALES, CÁPSULAS DEL **TIEMPO**

Su estudio revela el entorno en el que se formaron

Tradicionalmente, la clasificación de los minerales se ha basado en su fórmula química y estructura cristalina. Pero este sistema de 200 años de antigüedad omite una consideración esencial: las condiciones en que se formó el mineral, que podrían revelar rasgos clave de la Tierra primitiva u otros planetas.

El equipo de Shaunna Morrison, del Instituto Carnegie para la Ciencia, **ha descrito** ahora cómo complementar el sistema antiguo al clasificar todas las vías por las que los minerales pueden crecer y transformarse. Aquí se ilustran algunos ejemplos.

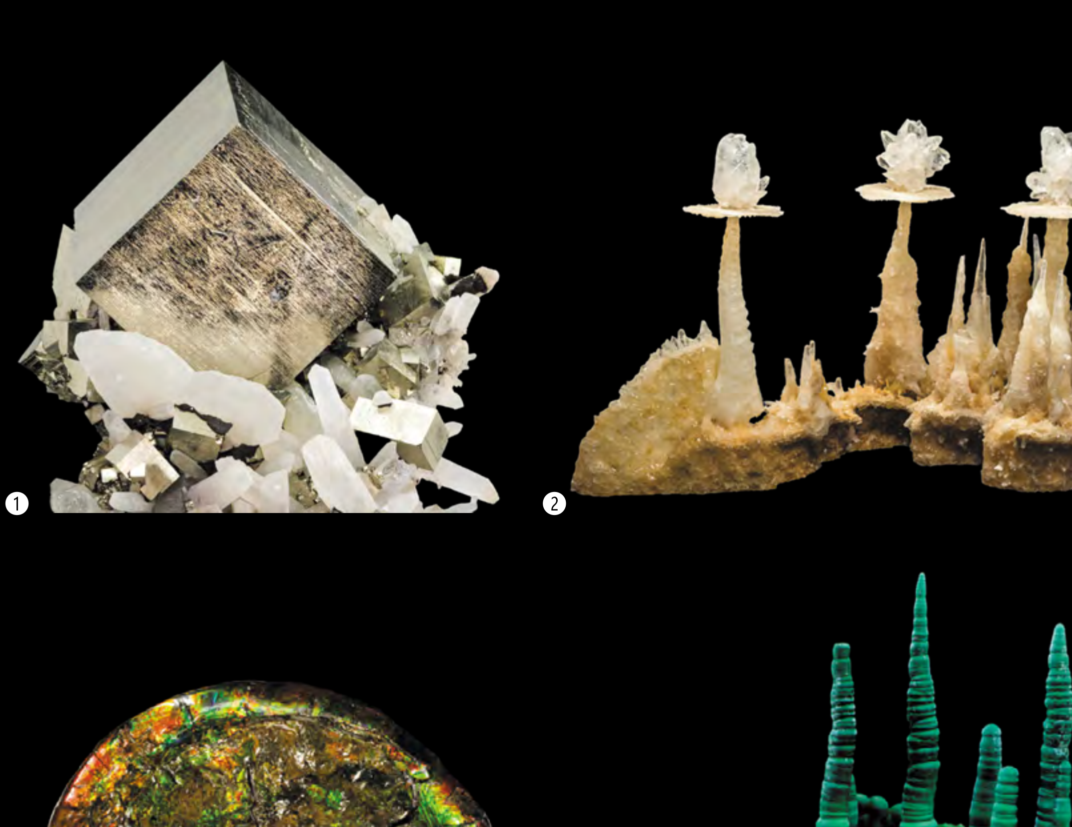
① La **pirita**, brillante y dorada, puede formarse mediante 21 procesos, desde la cristalización en respiraderos volcánicos hasta el crecimiento con la ayuda de bacterias. Cada uno deja su propia huella química, como trazas de contaminantes y variantes radiactivas de elementos químicos.

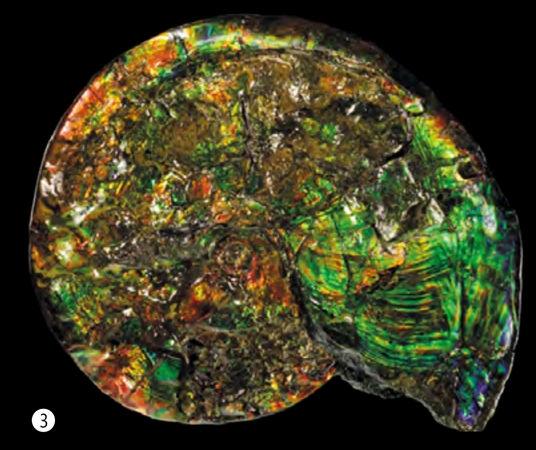
② El 80 por ciento de los minerales del planeta no existiría sin la presencia de agua. La forma cristalizada de esta **calcita** refleja niveles cambiantes de agua durante la Edad de Hielo en una cueva del sur de China. Este mineral puede formarse de al menos 17 maneras.

③ Fósiles como esta **amonita opalizada** se desarrollan cuando una mezcla de agua y sílice impregna conchas, huesos o dientes enterrados a gran profundidad. El equipo de Morrison identificó 1900 minerales originados directamente a partir de procesos biológicos.

④ La aparición de la vida en la Tierra permitió, directa o indirectamente, la formación de casi la mitad de los tipos de minerales. Algunos, como la **malaquita verde**, solo adquirieron una estructura estable después de que las bacterias de la Tierra primitiva comenzaran a expulsar oxígeno.

Fionna M. D. Samuels







MAURITIUS IMAGES GMBH/ALAMY STOCK PHOTO



FLIP NICKLIN/MINDEN PICTURES

INFORME ESPECIAL

ENIGMAS DEL FONDO MARINO

Los avances en los campos de la robótica, la teledetección y la genómica están acelerando los descubrimientos en las grandes profundidades marinas. En contra de lo esperado, está saliendo a la luz un lugar rebosante de vida y complejo.

«El ser humano se encuentra indefenso en el mar: es incapaz de respirar, apenas ve hasta donde alcanza el brazo extendido y no reconoce los sonidos que escucha», reflexiona la ecóloga marina Kelly Benoit-Bird, del Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey, en California. Tal vez por esa razón los humanos han contemplado siempre el mar como un enigma.

Los océanos cubren el 71 por ciento de la superficie del globo y, en volumen, constituyen el 99 por ciento del espacio habitable del planeta. Aun así, sabemos muy poco de las formas de vida que lo habitan. Pero eso está cambiando a pasos acelerados. Ayudados por vehículos submarinos autónomos, técnicas de teledetección avanzadas y secuenciadores de ADN móviles, los científicos y los exploradores están descubriendo sorpresas de todo tipo. En este informe especial, hemos reunido algunos de los últimos hallazgos más fascinantes, desde la superficie del mar hasta las profundidades casi insondables.

Mark Fischetti, editor

Multitud de organismos marinos emiten luz, lo que aporta pistas sobre el motivo por el que la superficie del mar se tiñe en ocasiones de un blanco fantasmagórico.

EL MISTERIO DEL MAR LECHOSO

Michelle Nijhuis | Se empieza a desentrañar un extraño fenómeno que ha sorprendido durante siglos a los navegantes

HENLEY SPIERS/MINDEN PICTURE

El 30 de enero de 1864, el *CSS Alabama* penetró en lo que su capitán describió como «un tramo de mar sorprendente». Como uno de los buques de guerra confederados que durante la guerra civil estadounidense libraron la guerra de corso contra los mercantes de la Unión en los mares, en aquel momento navegaba a lo largo del Cuerno de África con rumbo sudoeste. Pese a su condición de corsarios intrépidos, el capitán Raphael Semmes y su tripulación quedaron estremecidos ante el mar que contemplaron aquel anochecer de enero. «A eso de las ocho de la tarde, cuando las estrellas comenzaban a brillar en un cielo sereno sin luna, de repente pasamos del azul propio del mar profundo a surcar una mancha de agua tan blanca que me dejó sobrecogido», recordaba Semmes en sus memorias.

EN SÍNTESIS

El mar lechoso es un fenómeno conocido desde hace siglos por los relatos de marinos y navegantes cuya causa ha estado envuelta en el misterio hasta épocas recientes.

Los últimos estudios señalan como artífices a microorganismos acuáticos luminosos, en concreto a bacterias bioluminiscentes del fitoplancton.

Lejos de ser extraordinaria, la bioluminiscencia parece ser frecuente en las aguas profundas, donde, dada la ausencia perpetua de la luz solar, desempeñaría numerosos cometidos.

Las actividades humanas a gran profundidad, como la minería submarina, ponen en riesgo a esas comunidades de seres bioluminiscentes.

Primero pensó que la causa de aquel incesante reflejo pálido podía ser un arrecife somero, pero la sonda que mandó calar por la borda se hundió cien brazas (180 metros) sin tocar fondo. «En el horizonte se veía un brillo apagado, o un fulgor, producido como por una iluminación lejana, mientras sobre nosotros se cernía un cielo oscuro, espeluznante. El rostro de la naturaleza había cambiado por entero y, con un poco de imaginación, uno podía pensar en el *Alabama* como si de un barco fantasma se tratase, iluminado por la luz mortecina y sobrenatural de aquella mar fantasmagórica.» El buque navegó varias horas por las aguas misteriosas, hasta que quedaron atrás tan repentinamente como habían surgido.

La descripción de primera mano de Semmes ofrece uno de los primeros testimonios fidedignos de ese tipo de mar y supone una valiosa, aunque inadvertida, contribución a la ciencia. Ahora, tras combinar docenas de informes históricos con datos captados por satélites de vanguardia, los investigadores están próximos a descubrir uno de los misterios del océano más duraderos, esas vastas y efímeras exhibiciones de fantasmagórica luz viviente.

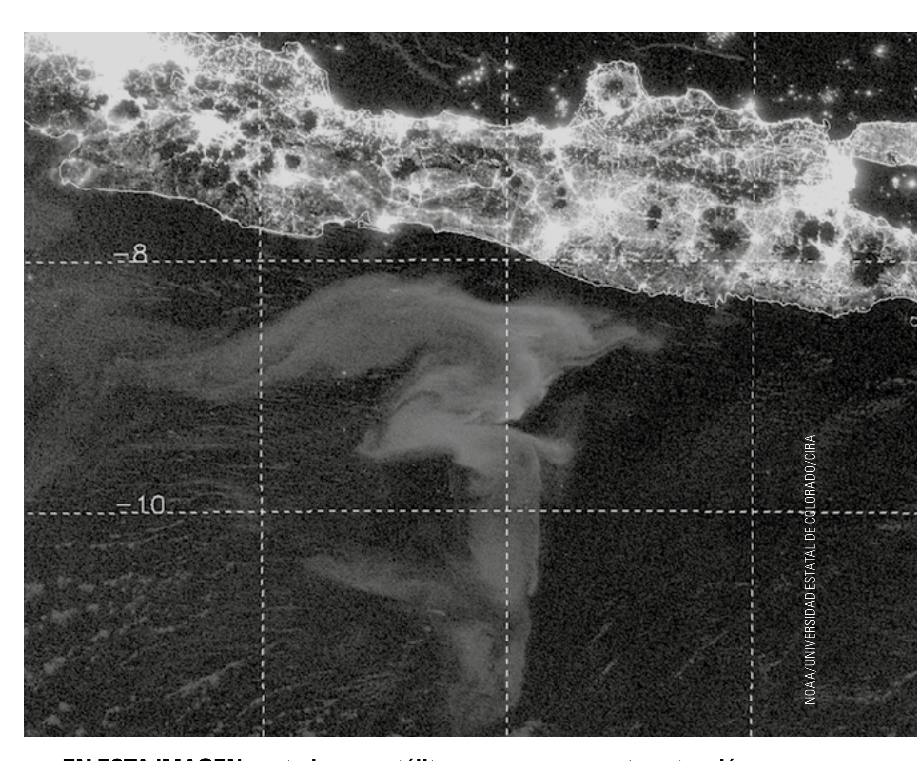
Miedo silencioso

La radiación fría emitida por las luciérnagas, ciertos hongos y varias criaturas marinas se denomina bioluminiscencia. Aunque se trata de uno de los sujetos de estudio científicos más antiguos, es también uno de los más esquivos. Los poemas y las canciones antiguas de numerosas culturas citan a menudo la luz de origen animal. En el siglo III a.C., Aristóteles observó que, en ocasiones, el agua del mar emitía destellos azulados cuando se la golpeaba con un garrote. Trescientos años después, Plinio el Viejo describió la bioluminiscencia de moluscos, medusas y setas, señalando también los rumores según los cuales la Selva Negra de Europa central brillaba debido a las aves bioluminiscentes, rumor que por desgracia nunca ha sido confirmado, a pesar de su persistencia.

En torno a 1370, el zoólogo egipcio Al-Damiri recogió insectos bioluminiscentes en su diccionario zoológico. Y en 1492, durante su trascendental aproximación a las Bahamas, Cristóbal Colón observó destellos de luz en el océano, un fenómeno que ahora la ciencia atribuye a gusanos marinos bioluminiscentes del género *Odontosyllis*, que periódicamente ascienden en masa a la superficie para realizar una danza circular de cortejo. A finales del siglo XIX, tras siglos de especulación, se llegó a la conclusión de que la bioluminiscencia era el resultado de una reacción de oxidación entre un enzima y su substrato, acontecida en el interior de las células animales y vegetales. Pero algunas preguntas seguían sin respuesta; nadie sabía qué impulsaba a especies diversas a producir luz ni para qué podría servir.

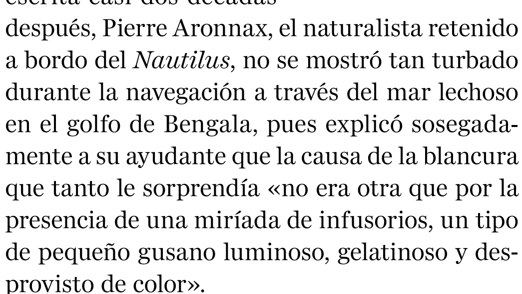
Numerosas descripciones de la bioluminiscencia, en la tierra y en el mar, hablan de destellos verdeazulados, en ocasiones desencadenados por una perturbación, como los garrotazos de Aristóteles. Pero descripciones como la del capitán Semmes sugieren un fenómeno completamente distinto. El agua marina surcada por los marineros estaba

bañada por una luz blanca estática, desprovista de súbitos destellos azules, cuyo brillo abarcaba millas de extensión. Aquellos mares lechosos eran tan extraños e infrecuentes que para muchos no eran más que leyendas, quizá más verosímiles que los encuentros con sirenas, pero poco más dignos de crédito. Herman Melville, en su épica *Moby Dick*, publicada en 1851, los tachó de mal presagio, describiendo «el callado miedo supersticioso» de los marineros al entrar «a media noche en un mar de blancura lechosa», como si «bancos de ondulantes osos blancos nadasen a su alrededor». En la novela de Julio Verne *20.000 leguas de viaje submarino*, escrita casi dos décadas



NOAA/UNIVERSIDAD ESTATAL DE COLORADO/CIRA

EN ESTA IMAGEN captada por satélites aparece una vasta extensión de aguas lechosas, de casi 104.000 kilómetros cuadrados. Aparecida al sur de Java en el verano de 2019, duró 45 días.



después, Pierre Aronnax, el naturalista retenido a bordo del *Nautilus*, no se mostró tan turbado durante la navegación a través del mar lechoso en el golfo de Bengala, pues explicó sosegadamente a su ayudante que la causa de la blancura que tanto le sorprendía «no era otra que por la presencia de una miríada de infusorios, un tipo de pequeño gusano luminoso, gelatinoso y desprovisto de color».

El naturalista de Verne seguía la pista correcta, pero haría falta un siglo más para que la ciencia diera alcance a la ciencia ficción. En julio de 1985, un buque de investigación de la Armada estadounidense se topó con aguas lechosas frente a las costas de la península arábiga. Los científicos a bordo, que estaban realizando un amplio estudio sobre la bioluminiscencia marina, contaban con el equipo oportuno para aprovechar aquel golpe de suerte y, sin pestañear, tomaron muestras de agua para analizarlas. Aparte de los dinoflagelados, los copépodos y otros tipos de plancton que protagonizan las explosiones centelleantes ya familiares, las muestras contenían bacterias bioluminiscentes. Plantearon, pues, que el mar lechoso aparecía tras la proliferación y la muerte de algas microscópicas en la superficie del océano. La ruptura de las células muertas liberaría lípidos, que serían consumidos por las bacterias, cuya proliferación masiva les permitiría alcanzar una concentración lo bastante elevada como para emitir un brillo continuo.

Al fin se pudo confirmar que el mar lechoso era un fenómeno científico con una causa biológica. Pero averiguar dónde, cuándo y por qué se producía exactamente, exigiría algo más que las pistas aportadas por un encuentro fortuito.

Navegar sobre la nieve

La bioluminiscencia marina representa un problema para la Armada de los Estados Unidos, porque una mancha de agua brillante puede delatar la presencia de un submarino sumergido y convertirlo en un blanco fácil. A principios del siglo xxi, Steven Miller, un científico atmosférico entonces adscrito al Laboratorio de Investigación Naval en Monterrey, California, empezó a preguntarse si los satélites en órbita podrían detectar la bioluminiscencia. Los únicos sensores capaces de detectar la luz visible por la noche pertenecían al sistema operativo de barrido lineal (OLS), instalados a bordo de los satélites de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Miller sabía que la mayoría de las manchas de bioluminiscencia marina eran demasiado pequeñas para ser detectadas

por los sensores y, por probar suerte, buscó en Internet referencias acerca de la bioluminiscencia a gran escala. Así encontró una descripción del mar lechoso en la web «Science frontiers», un catálogo idiosincrásico de fenómenos «inusuales e inexplicados», mantenida en aquel entonces por el físico W. R. Corliss.

Espoleado por la curiosidad, empezó a recabar los testimonios de testigos presenciales. Entre ellos, encontró un informe relativamente reciente de un mercante británico, el *SS Lima*, que el 25 de enero de 1995 había atravesado un mar lechoso a lo largo del Cuerno de África. «La bioluminiscencia cubría todo el mar, hasta el horizonte», según la anotación en el cuaderno de bitácora, «parecía como si el barco navegara por un campo nevado o se deslizara sobre las nubes».

Al buscar las imágenes del OLS correspondientes a la localización del *Lima* aquel día, Miller no vio nada de entrada. Pero al ampliarlas, observó un tenue borrón en forma de coma. «Parecía un trozo de huella dactilar, pero se desplazaba con la imagen», recuerda. Comprobó que los bordes de la mancha coincidían con las coordenadas registradas por el buque al entrar y salir de las aguas lechosas, de una extensión de 14.000 kilómetros cuadrados. Al examinar las imágenes de los días previos, encontró la misma mancha, girando en sentido antihorario, tal como hacen las corrientes locales. «Vale. Es posible ver la bioluminiscencia desde el espacio», pensó.

Miller contactó entonces con Steven Haddock, biólogo marino del cercano Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (MBARI), para compartir sus hallazgos. Como él, Haddock tampoco había visto en persona el mar lechoso, pero estaba familiarizado con el fenómeno, básicamente porque uno de sus mentores, el biólogo marino Peter Herring, ahora jubilado, había catalogado centenares de descripciones del fenómeno, que se remontaban hasta el relato del capitán Semmes en el *Alabama*. Haddock, que estudiaba sobre todo la bioluminiscencia de las medusas, había pasado gran parte de su carrera intentado acercarse todo lo posible a los organismos bioluminiscentes por medio de sumergibles, tripulados o no. Ambos emprendieron una colaboración.

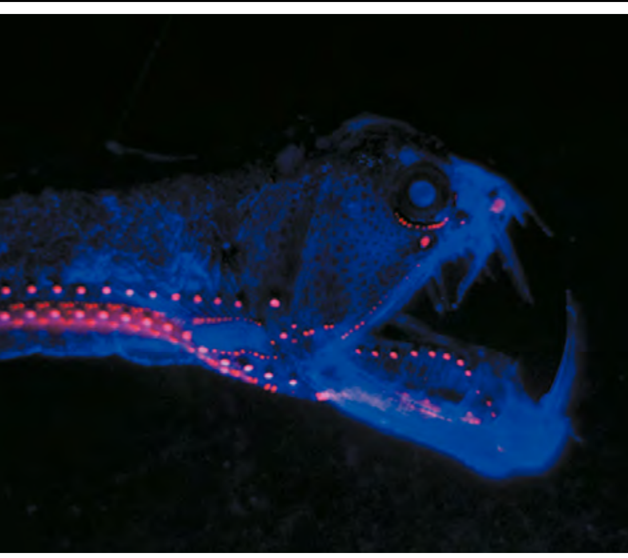
La detección de 1995 mediante el OLS había sido una casualidad, fruto de la perseverancia de Miller y de la posición fortuita de un satélite, pero esperaba que un nuevo sensor, denominado de banda de día-noche (BDN) y mucho más sensible a la luz de baja intensidad del espectro visible, permitiera el examen sistemático del mar lechoso. Lanzado en 2011, el sensor se encuentra a bordo de dos satélites, cada uno de los cuales orbita diariamente una vez en torno a la Tierra a 800 kilómetros de altura (órbita geosincrónica). Cien veces más sensible que su predecesor, el sensor BDN capta sin dificultad la claridad emitida por el mar lechoso, aunque por esa misma razón también recoge la tenue luminiscencia nocturna producida por la absorción de la luz ultravioleta en la alta atmósfera, parte de la cual se refleja en las nubes. «Por todas partes hay nubes. La luminiscencia nocturna se emite hacia arriba y a veces es realmente difusa, como un velo luminoso», explica Miller. Diferenciar la bioluminiscencia de esos otros fenómenos «nos llevó años mirando imágenes realmente borrosas.»

Gracias al largo historial de descripciones de navegantes, Miller y Haddock sabían que el mar lechoso es más frecuente en invierno y en verano; y que el Índico noroccidental, allí donde el *Alabama* y el *Lima* se habían topado con él, era donde se observaba con mayor frecuencia, así como en torno a Indonesia, en particular cerca de la isla de Java y en el mar de Banda. Centrando su búsqueda en esos lugares y esas épocas, Miller analizó los datos del sensor BDN procedentes de noches sin luna entre 2012 y 2021 hasta dar por fin con docenas de fenómenos que no eran nubes ni luminiscencia nocturna, permanecían invisibles durante el día y derivaban con las corrientes durante varias noches. Un episodio registrado en 2019, justo al sur de Java, fue visible durante al menos 45 noches y llegó a abarcar algo más de 100.000 kilómetros cuadrados, una extensión similar a la del mar de Irlanda, que separa esta isla de Gran Bretaña. El uso del sensor BDN y la persistencia del fenómeno por espacio de varias semanas harían posible enviar un equipo científico para bucear en ellos. «Desde el espacio no se puede hacer gran cosa: no puedes sumergirte, tampoco ver la distribución vertical del brillo en la columna de agua, ni obtener muestras de bichitos, ni analizar con detalle la composición química. Has de estar ahí para estudiarlo a fondo.»

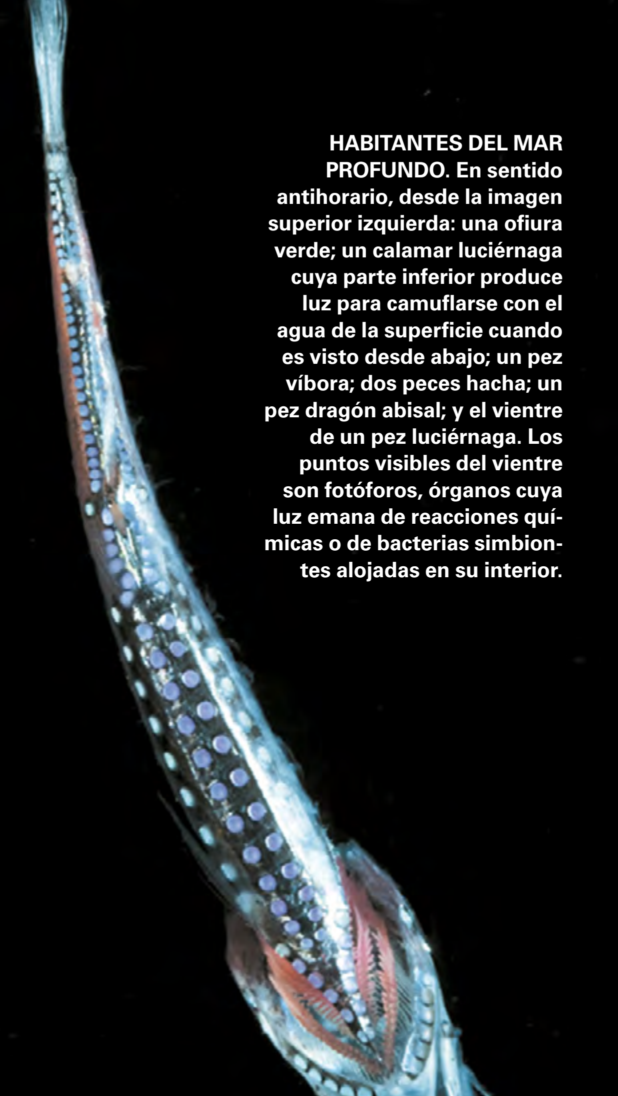
Mientras Miller aguarda la oportunidad para zambullirse en el mar lechoso, continúa ampliando su colección de avistamientos. Una incorporación reciente proviene de Sam Keck Scott, quien en el verano de 2010 ayudó en la singladura de un queche holandés restaurado desde Malta hasta Singapur, a través del mar Arábigo. Un anochecer











HABITANTES DEL MAR PROFUNDO. En sentido antihorario, desde la imagen superior izquierda: una ofiura verde; un calamar luciérnaga cuya parte inferior produce luz para camuflarse con el agua de la superficie cuando es visto desde abajo; un pez víbora; dos peces hacha; un pez dragón abisal; y el vientre de un pez luciérnaga. Los puntos visibles del vientre son fotóforos, órganos cuya luz emana de reacciones químicas o de bacterias simbiontes alojadas en su interior.



JEROME MALLEFET/MINDEN PICTURES, DAVID SHALE/MINDEN PICTURES, DAVID SHALE/MINDEN PICTURES,JEROME MALLEFET-FNRS/MINDEN PICTURES *(en sentido antihorario desde arriba a la izquierda)*

de finales de julio, cuando iniciaba su guardia, Scott advirtió un extraño resplandor en el aire. Al cabo de un rato cayó en la cuenta de que podía ver las velas y el casco, aunque era ya noche cerrada. Todo el océano brillaba y parecía iluminado desde su interior. Scott y sus compañeros de tripulación tardaron cuatro horas en cruzar las aguas blanquecinas, que dejaron atrás de una forma más repentina si cabe de cómo habían entrado. «Sabíamos que era algún tipo de bioluminiscencia, pero jamás la había visto a esa escala tan enorme», recuerda.

Alarma luminosa

A distancia, los científicos han propuesto varias hipótesis para explicar la formación del mar lechoso. Investigadores de la expedición de la Armada estadounidense de 1985 teorizaron que las bacterias bioluminiscentes que encontraron se habían congregado en torno a una floración algal. Desde entonces, otros han sugerido que la iluminación estática es el resultado de la percepción de *quorum*, es decir, la habilidad de las bacterias para comunicarse mediante señales químicas y coordinar sus respuestas: cuando su densidad es lo bastante elevada como para producir un brillo perceptible, mantienen un resplandor permanente. Pero, ¿por qué? Algunos biólogos opinan que la bioluminiscencia de otros organismos los ayuda a atraer a las presas o a las parejas, o funciona como una especie de alarma, que lanza destellos al ser atacados, con la esperanza de atraer así a los enemigos de sus depredadores. El brillo colectivo de las bacterias funcionaría de otro modo: cuando se agota el alimento disponible para una colonia suspendida en el agua, la bioluminiscencia atraería a los peces, que al ingerir las bacterias permitirían su supervivencia alojadas en su tubo digestivo.

Una década de datos de sensores BDN apoya solo en parte la idea de que el mar lechoso surge principalmente en el invierno y a finales del verano. Eso sería cierto en el océano Índico noroccidental, cuando los monzones invernales y estivales desencadenan la proliferación del fitoplancton al hacer aflorar agua fría y rica en nutrientes desde las profundidades. Sin embargo, más al este, el mar lechoso parece desencadenarse por el llamado dipolo del océano Índico, un cambio en la temperatura superficial del mar similar a El Niño, asociado a la conjunción de condiciones frías y secas con vientos fuertes en el este del Índico, entre mayo y octubre. Los datos de los satélites también ofrecen una explicación de por qué el brillo en ocasiones parece propagarse hasta cierta profundidad, creando así la percepción en los marineros de que la embarcación flota repentinamente en la luz. Miller observó que, en ocasiones, el mar lechoso aparece en la calma relativa entre dos remolinos oceánicos, donde una combinación de corrientes y gradientes de temperatura aísla del océano colindante una masa de agua, que permanece estacionaria. Tales condiciones, supone, estimularían poblaciones muy densas de bacterias, cuya percepción de *quorum* se extendería tanto en sentido vertical como horizontal a las colonias próximas, lo cual aumentaría la profundidad y la extensión del mar lechoso.

Miller y Haddock esperan que las prestaciones del sensor BDN permitan detectar y, con el tiempo, predecir la aparición del mar lechoso. De ese modo se podría acudir sin demora allá donde surja en busca de muestras y someter a prueba sus hipótesis. Hasta entonces, es poco probable que revele todos sus misterios.

Brillo por doquier

Los secretos del mar lechoso persisten en parte porque todavía permanecen sin respuestas preguntas mucho más básicas sobre la naturaleza, la función y la extensión de la propia bioluminiscencia. Como la mayor parte de las formas de vida bioluminiscentes viven en el mar, muchas a gran profundidad, ser testigo directo del fenómeno ha requerido recursos considerables y una dosis nada despreciable de intrepidez. La bióloga marina Edith Widder, fundadora en 2005 de la Asociación para la Investigación y la Conservación de los Océanos, inició sus estudios pioneros sobre luminiscencia en la década de 1980. En su libro *Below the edge of darkness*, publicado en 2011, rememora sus numerosas, y en ocasiones escalofriantes, experiencias a bordo de los sumergibles, como una vía de agua abierta a mil metros de profundidad que puso en peligro su vida. «He pasado gran parte de mi carrera en sumergibles trabajando en la oscuridad, porque hasta hace muy poco no disponíamos de cámaras capaces de percibir tanto la luz como el color de la bioluminiscencia», me dijo. «Es de una belleza asombrosa, y al fin [otros] están logrando verla.»

Widder y otros investigadores que han participado en descensos a las profundidades saben desde hace décadas que la bioluminiscencia es un fenómeno habitual. Pero el primer cálculo fiable



UN DIABLO MARINO NEGRO (*Melanocetus sp.*) despliega el señuelo transparente de su cabeza y se mantiene al acecho, a casi 4000 metros bajo el agua. Las bacterias que viven en su interior producen luz, que atrae a las presas. Se desconoce cómo regula la emisión de luz.

DAVID SHALE/MINDEN PICTURES

de su frecuencia no se obtuvo hasta 2017, cuando Haddock y Séverine Martini, entonces investigadora postdoctoral en MBARI y ahora adscrita al Instituto Mediterráneo de Oceanografía, en Marsella, publicaron un análisis de 17 años de filmaciones realizadas por vehículos operados a distancia frente a las costas de California. A partir de 350.000 observaciones, con más de 500 grupos de organismos y filmadas desde justo debajo de la superficie hasta casi 4000 metros, Martini y Haddock concluyeron que al menos tres cuartos de los organismos eran capaces de producirla. Este porcentaje era relativamente constante a diferentes profundidades. En un estudio de 2019, se observó que un tercio de los organismos propios del fondo marino eran bioluminiscentes. Martini encontró una esponja carnívora que no era nueva para la ciencia, pero sí el primer caso documentado de bioluminiscencia en el filo de los poríferos al que pertenece.

Puesto que el océano es el espacio habitable más extenso del planeta, los dos análisis sugieren que la bioluminiscencia es una de las características ecológicas más extendidas en la Tierra. «No es algo tan extraño como para no poder verlo en la vida. En el mar, todo emite luz, solo has de estar atento», afirma Martini. Para ella, Haddock, Widder y el resto de los escasos biólogos marinos que la estudian, su ubicuidad no hace sino acrecentar el interés por el papel ecológico, la historia evolutiva, la bioquímica y la genética que la explican, así que no ocultan su entusiasmo al pensar en los avances que brindarán las cámaras subacuáticas de alta definición y la secuenciación genética, nuevos modos de aproximación a ese mundo inaccesible.

La humanidad se ha beneficiado enormemente de los organismos bioluminiscentes. Los investigadores en biología y medicina a menudo emplean una proteína verde fluorescente, descubierta en una medusa en la década de 1960, como marcador de proteínas y otros componentes celulares. Widder emplea bacterias bioluminiscentes para localizar focos de contaminación en la laguna salobre de Indian River, en Florida, uno de los estuarios con mayor diversidad de Norteamérica. Los fertilizantes y los plaguicidas arrastrados por el agua de escorrentía desde los campos y los céspedes de los jardines, así como las infiltraciones de aguas residuales, han envenenado durante décadas la laguna, que acumula los contaminantes en sus sedimentos. Como muchos de ellos interfieren con la respiración de las bacterias y, en consecuencia, con la bioluminiscencia que estas emiten, Widder y sus compañeros han tomado sedimentos y los han mezclado con bacterias bioluminiscentes en el laboratorio para determinar la concentración relativa de contaminantes a lo largo de la laguna, lo que ayuda a orientar las medidas de seguimiento, mitigación y descontaminación.

Ahora que no cesan de aparecer nuevas aplicaciones de la bioluminiscencia, la capacidad de los organismos marinos para beneficiarse de ella parece amenazada. La fiebre desatada por explotar valiosos minerales del lecho marino puede tener un enorme impacto no solo en el propio lecho, sino en la totalidad del mar profundo, donde el agua en general es lo suficientemente transparente como para permitir la comunicación entre los organismos bioluminiscentes a cientos de metros. Los vehículos mineros robóticos levantan grandes nubes de sedimento cuando se desplazan por el fondo. El material recolectado se bombea hasta la superficie, donde, una vez separados los nódulos metalíferos, el sedimento descartado enturbia de nuevo el agua en su regreso al fondo, antes transparente, lo que perturba sin remedio la comunicación entre los organismos bioluminiscentes y afecta a su capacidad para encontrar alimento y pareja.

«En el contexto de la ecología y la salud de los mares, es importante entender cuán extendida y común es la bioluminiscencia», dice Haddock, coautor de un artículo publicado en 2020 sobre el impacto de la minería en los fondos marinos. «Si haces algo que altere ese proceso, se producirán una serie de efectos colaterales que de momento solo podemos vislumbrar.» Los mares luminosos que aterraron a tantas generaciones de marinos no causaron víctimas y no dejaron rastro alguno; los mares turbios creados por la actividad humana pueden, sin embargo, apagar para siempre la luz del océano.

Michelle Nijhuis es la autora de *Beloved beasts: Fighting for life in an age of extinction* (W. W. Norton, 2021), una historia del movimiento conservacionista moderno.



EN NUESTRO ARCHIVO

Quimioluminiscencia y bioluminiscencia. José A. Cabezas en *IyC*, marzo de 1984.
La luz de los fondos marinos. Bruce H. Robinson en *IyC*, septiembre de 1995.
Moléculas alumbradoras. Oriol Vendrell en *IyC*, diciembre de 2008.



¿ÁNGEL O MONSTRUO?
Cuando un ángel de mar caza, se transforma en un monstruo. Esta babosa marina de medio palmo de largo alberga en el interior de la cabeza seis «tentáculos» gelatinosos denominados conos bucales (*izquierda*). Cuando percibe cerca una presa, sus músculos internos se contraen y lanzan a la velocidad del rayo los tentáculos, que apresan al objetivo en milisegundos (*derecha*).

ALEXANDER SEMENOV

EL LECHO MARINO, PALMO A PALMO

Mark Fischetti| La cartografía de alta resolución está revelando sorprendentes formaciones submarinas por doquier

Los oceanógrafos se enorgullecen de afirmar que sabemos más de la superficie de la Luna que del fondo marino de la Tierra. Es cierto. Hasta 2017 solo se había cartografiado el 6 por ciento del lecho marino, en su mayoría a cargo de buques equipados con aparatos de sónar que van y vienen en línea recta sobre cuadrículas imaginarias trazadas sobre el mar.

Desde entonces, algunos países han redoblado sus esfuerzos para cartografiar el fondo del mar dentro de sus «zonas económicas exclusivas», que se internan 200 millas náuticas desde la costa, en parte en busca de minerales estratégicos que puedan ser extraídos con gran maquinaria de minas. Otra iniciativa es Seabed 2030, una empresa conjunta de la Fundación Nippon y la ONG Carta Batimétrica General de los Océanos que pretende cartografiar el fondo marino de todo el planeta antes de que finalice 2030.

El objetivo es recopilar y unir los mapas trazados por Gobiernos, empresas privadas e instituciones científicas de todo el mundo. La difusión pública de datos batimétricos, que hasta ahora obraban en manos privadas, está ayudando a ensanchar la superficie cartografiada. Y los vehículos de control remoto no tripulados, equipados con sónar y que pueden permanecer sumergidos durante días, están acelerando el ritmo del levantamiento cartográfico. En junio de 2022 ya se había alcanzado el 21 por ciento del lecho marino planetario, una cifra impresionante. A medida que crece la extensión cartografiada, aumentan también las sorpresas, como las tres formaciones insólitas que mostramos aquí.

Mark Fischetti es editor de *Scientific American* especializado en sostenibilidad.





TORRE CORALINA

PACÍFICO SUR, 90 KILÓMETROS AL ESTE DE LA PENÍNSULA DEL CABO YORK, AUSTRALIA

Científicos de la Universidad James Cook de Australia andaban cartografiando el relieve submarino situado justo por debajo del extremo norte de la Gran Barrera de Coral con un sónar multihaz cuando se tropezaron con una torre coralina aislada de 500 metros de altura, mayor que el Empire State Building de Nueva York. La base de la gigantesca cuña, con forma de aleta de tiburón, tiene más de 1,5 kilómetros de ancho, y la cima se sitúa solo a 40 metros de la superficie. Las inmersiones llevadas a cabo por un vehículo de control remoto han revelado que la torre está habitada por multitud de peces y no muestra señales del blanqueamiento que asuela a la Gran Barrera.

MACIEJ FROLOW



PROVINCIA DEL MILLÓN DE COLINAS DE CORAL

ATLÁNTICO NORTE, 185 KILÓMETROS AL ESTE DE GEORGIA, EE.UU.

Investigadores de la NOAA han cartografiado esta zona formada por montículos coralinos de entre 10 y 100 metros de altura que tapizan 28.000 kilómetros cuadrados de suelo oceánico. Es el ecosistema de corales de aguas profundas más extenso descubierto hasta ahora. El lecho marino, situado entre 600 y 800 metros de profundidad, no recibe luz. Los corales son blancos, ya que no albergan las algas simbióticas que colorean los arrecifes de las aguas someras. A medida que los corales viejos mueren, los nuevos se asientan sobre sus esqueletos; algunos montículos llevan creciendo así desde hace milenios.

MACIEJ FROLOW



DIQUE ROCOSO DEL GLACIAR RYDER

OCÉANO ÁRTICO, FIORDO SHERARD OSBORN, GROENLANDIA NOROCCIDENTAL

El frente de avance de este glaciar está perdiendo menos hielo que otros en Groenlandia. Un equipo de geólogos de la Universidad de Estocolmo ha navegado por el fiordo en un rompehielos equipado con un sónar multihaz. En el lecho rocoso, han descubierto dos diques paralelos que, separados por una cuenca, atraviesan el fiordo (*rojo*). El dique interior, de unos 6 kilómetros de ancho y entre 500 y 600 metros de altura, impide que las aguas relativamente templadas del Atlántico alcancen la base del glaciar y lo derritan, lo que explica su menor retroceso.

MACIEJ FROLOW

MACIEJ FROLOW

DEVORADOR OCULTO
El solitario pez telescopio (*Giganturidae*) vive a un kilómetro y medio bajo la superficie, donde se alimenta de organismos bioluminiscentes. Se orienta verticalmente para atisbar a sus presas cuando nadan por encima de él, antes de lanzar una dentellada con sus mandíbulas horripilantes. Cuando devora un bocado brillante se arriesga a que, iluminado desde dentro, se haga visible a sus enemigos. Así que, para permanecer oculto, ha desarrollado un estómago opaco que, como un velo negro, oscurece a las presas devoradas.

DANTÉ FENOLIO/SCIENCE SOURCE

El zooplancton migra por billones cada noche desde las profundidades del mar hasta la superficie, en un viaje de ida y vuelta. Cada especie lo hace a su ritmo, que puede variar según la edad, la época del año y el sexo.

MIGRACIÓN SIGILOSA

Katherine Harmon Courage | El movimiento diario y coordinado de incontables animalillos marinos influye en todos y cada uno de los habitantes del planeta

TONAQUATIC/GETTY IMAGES

Cada anochecer, billones de animales que integran el zooplancton, muchos menores que un grano de arroz, permanecen suspendidos a decenas de metros bajo la superficie del mar aguardando una señal. Durante mucho tiempo, la ciencia los ha considerado una suerte de viajeros pasivos que, movidos por las corrientes y las mareas, vagaban a la deriva por el océano. Pero, de repente, poco antes del ocaso, el enjambre inicia el ascenso en un viaje sigiloso hacia la superficie.

En el trayecto se les unen otros miembros del zooplancton: copépodos, salpas, krill y larvas de peces. La multitud permanece toda la noche cerca de la superficie, hasta que con los primeros rayos de luz matinal empieza a dejarse caer, de vuelta a las profundidades. A medida que el anochecer y el amanecer se desplazan de este a oeste cada 24 horas, a través del Pacífico, del Índico y luego del Atlántico, los sucesivos enjambres emprenden el mismo viaje ascendente y descendente.

Llamado migración vertical diaria, la mayoría de las personas desconoce el fenómeno, pese a ser el mayor desplazamiento de seres vivos en la Tierra. Cálculos recientes cifran en un billón de toneladas el peso de las formas de vida animal que cada día emprenden semejante excursión. Algunas ascienden más de 1000 metros, toda una hazaña. El equivalente humano de una larva de pez de medio centímetro que sube 300 metros sería que una persona recorriese a nado más de 80 kilómetros, en el plazo de una hora. Durante el trayecto atraviesan zonas del océano con condiciones muy diferentes. A 300 metros, el agua ronda los 4 grados centígrados, quizá 6 menos que en la superficie, y la presión alcanza las 31 atmósferas, 30 veces más que a flor de agua. ¿Por qué esa ingente cantidad de animales minúsculos se embarca en tan arduo viaje cada día?

La respuesta breve es para comer y no ser comido. Durante el día, el vulnerable zooplancton se oculta de los peces y los calamares en la oscuridad de las profundidades. Cuando cae la noche se apresura hacia la superficie para alimentarse, a resguardo de la oscuridad, del fitoplancton, formado por las algas microscópicas y otros organismos fotosintéticos que habitan las decenas de metros más superficiales de la columna de agua.

Pero esta es solo la corriente principal de la migración vertical, pues existen también corrientes cruzadas y remolinos. Gracias a los sónares cada vez más sofisticados, los vehículos submarinos autónomos y los avances en la secuenciación del ADN se empiezan a conocer los pormenores, lo que ayuda a responder preguntas con implicaciones globales para las redes tróficas marinas, el balance global de carbono y la naturaleza última de la vida en la Tierra.

> **EN SÍNTESIS**
>
> **La mayor migración** de seres vivos del planeta la protagoniza el plancton en las aguas marinas. Es diaria y no es horizontal, sino vertical.
>
> **La investigación** del fenómeno entraña no pocas dificultades por las características de los organismos y la naturaleza y vastedad del océano.
>
> **Hoy más que nunca**, su estudio reviste importancia por las implicaciones que tiene en el clima planetario, pues el mar actúa como un enorme sumidero de carbono, gracias en parte a la actividad biológica que acoge.

Baile en las profundidades

Los primeros registros de la migración vertical diaria se remontan a la Segunda Guerra Mundial, cuando los barcos y submarinos equipados con sónar para eludir a los submarinos enemigos detectaban en ocasiones ecos extraños, como si el fondo marino oscilase arriba y abajo. Ese fenómeno, en el que se reflejaban las ondas de sonido, se dio en llamar la capa profunda de dispersióno. La capa fluctuaba dos veces al día, hasta un máximo de 1000 metros, unos cambios que desafiaban la lógica. En 1945, el oceanógrafo Martin Johnson se embarcó en un buque de investigación para muestrear el plancton a distintas horas y profundidades a lo largo de 24 horas. «Estas observaciones preliminares indican la existencia de algún tipo de interrelación entre los animales planctónicos y la capa de dispersión profunda», escribió. Ahora bien, la propuesta de que dicha capa estuviera formada por seres vivos planteó más dudas que respuestas.

Y obtenerlas no fue fácil. Los animales son diminutos, los movimientos tienen lugar en la oscuridad y no es nada sencillo acceder a las aguas profundas. El seguimiento de enjambres de animales del tamaño de una pulga a través de las tinieblas resulta más dificultoso que el de las migraciones de las ballenas entre ambos hemisferios. En la década de 1990, se había aprendido

lo suficiente como para describir la migración vertical diaria como una nube de organismos que ascendían y descendían al unísono. Los sónares de alta resolución detectaban grupos de organismos y movimientos ascendentes y descendentes más sutiles. Pero incluso hoy, los muestreos mediante sónar no pueden identificar a los diminutos animales en movimiento. El muestreo del zooplancton, tal como hizo Johnson, lleva los ejemplares a la superficie y posibilita su identificación, pero difumina los detalles de tiempo y espacio que permitirían saber en qué tramo del viaje se halla cada ejemplar.

A pesar de las trabas, nuevas investigaciones han revelado detalles ocultos de las migraciones en masa. En primer lugar, el proceso está ligado íntimamente con los fenómenos celestes. Cuando el sol desaparece varias semanas durante el invierno polar, algunos organismos reemplazan el desplazamiento diario por un ciclo de migración lunar. Los eclipses solares pueden incitarlos a subir a la superficie. El zooplancton que habita por debajo de los 300 metros, donde la intensidad lumínica es tan solo el 0,102 por cien de la presente en la superficie, cambia de posición unos 60 metros cuando el paso de las nubes amortigua aún más la luz incidente, explica Deborah Steinberg, directora del Departamento de Ciencias Biológicas del Instituto de Ciencias Marinas de Virginia. Se dio cuenta durante un crucero, cuando ni ella ni sus compañeros podían percibir los cambios de la intensidad luminosa en la superficie. «Desde nuestra perspectiva en el barco, el cielo permaneció nublado, gris y lluvioso todos y cada uno de los días», remarcaron ella y los demás autores en su artículo de 2021. De algún modo, el zooplancton se adaptaba a los ínfimos cambios de luminosidad que percibía a gran profundidad.

Los vehículos autónomos dotados con cámaras e instrumental para la toma de muestras, que permiten emparejar fotografías con datos sobre las señales químicas en la columna de agua, han empezado a ofrecer una nueva visión de la migración, desde la perspectiva de sus protagonistas. Por ejemplo, Kelly J. Benoit-Bird, adscrita al Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (MBARI), en California, y Mark Moline, de la Universidad de Delaware, enviaron un sumergible autónomo a 300 metros bajo el agua en la cuenca de Santa Catalina, frente al sur de California, donde hizo mediciones con sónar de la migración vertical. Los resultados fueron impactantes: el zooplancton se organizaba en grupos definidos, perfectamente delimitados en función de su taxonomía, cada uno de los cuales migraba conjuntamente, en ascensos perfectamente orquestados.

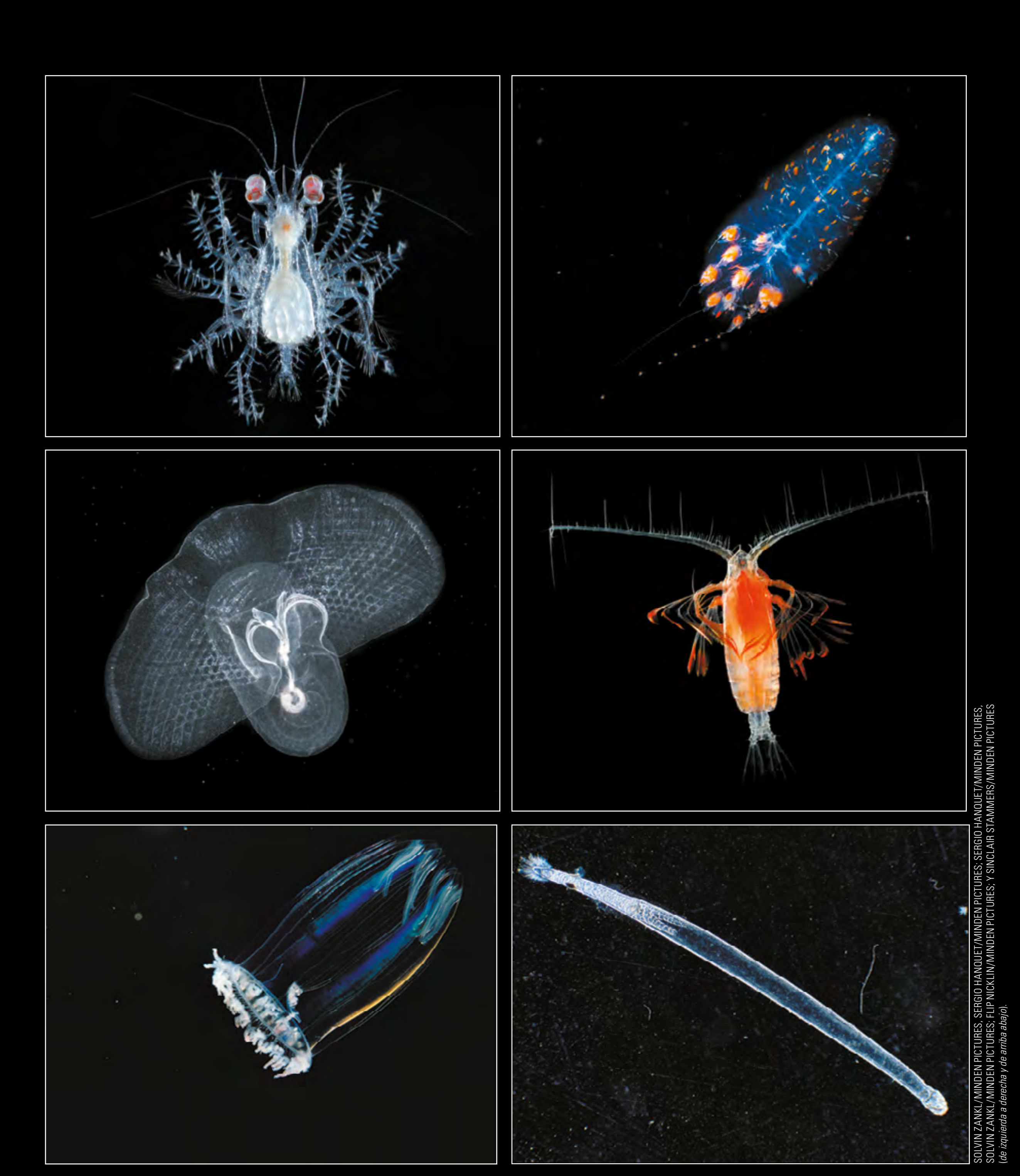
«Debemos empezar a verlo no como un movimiento en masa, sino como un fenómeno donde las características individuales y de la especie son relevantes», opina Benoit-Bird. Y el zooplancton aventurero no está solo en su desplazamiento nocturno. Asegura que «son muchos los animales que siguen la misma estrategia». Pulpos, peces linterna, sifonóforos y una plétora de criaturas de las aguas profundas también marchan por la noche con el fin de evitar a los depredadores y hallar alimento, en su caso otros viajeros.

Todos en movimiento

Los animales podrían no ser los únicos organismos que realizan migraciones verticales periódicas. Kai Wirtz es profesor y modelador de ecosistemas en el Instituto de Sistemas Costeros Helmhotz-Zentrum Hereon, en Alemania. En 2016, él y sus colaboradores intentaban describir cómo la distribución de diferentes grupos de fitoplancton reflejaba las características de cada ambiente marino. Pero se percató de que la circulación del agua no bastaba, por si sola, para aportar desde las profundidades las cantidades de nitrógeno y fósforo precisas para sustentar la gigantesca masa superficial de fitoplancton.

Desde hace tiempo se sabe que numerosas especies de fitoplancton se mueven: algunas modifican su flotabilidad desprendiéndose de parte de sus lípidos, otras cambian de forma o agitan los flagelos que poseen. Wirtz reflexionó sobre ello al mirar en perspectiva la estructura de la columna vertical del océano: en la superficie abunda la luz solar, pero no los nutrientes, y el fondo no recibe la luz suficiente para que vivan los organismos fotosintéticos, pero rebosa de nutrientes. Entonces, pensó: ¿por qué no deberían las algas y demás organismos fotosintéticos emplear sus capacidades de locomoción para desplazarse entre ambas zonas? En realidad, «no existe una respuesta sencilla,» afirma.

De acuerdo con sus cálculos, es posible que la mitad de los tipos de fitoplancton realice migraciones verticales regulares de entre docenas y un centenar de metros, transportando nutrientes desde abajo, y energía solar desde arriba. Para estos organismos microscópicos, semejante viaje dura horas, días e incluso semanas, de modo



SOLVIN ZANKL/MINDEN PICTURES; SERGIO HANQUET/MINDEN PICTURES; SERGIO HANQUET/MINDEN PICTURES, SOLVIN ZANKL/MINDEN PICTURES; FLIP NICKLIN/MINDEN PICTURES; Y SINCLAIR STAMMERS/MINDEN PICTURES (*de izquierda a derecha y de arriba abajo*).

EL BESTIARIO DEL ZOOPLANCTON abarca una enorme diversidad de minúsculas formas animales. De izquierda a derecha y de arriba abajo: fase larvaria de cangrejo conocida como megalopa, procedente del océano Atlántico; ejemplar rojiazul procedente de las Islas Canarias; mariposa marina, también de las Canarias; copépodo, de aspecto similar a un insecto, extraído de las profundidades del Atlántico pero abundante en los trópicos; especie bioluminiscente azul procedente del Ártico; y sagita, presente en todos los mares, desde la superficie hasta las profundidades.

que algunos se reproducen durante el camino, por lo que traspasan a sus descendientes el cumplimiento de la misión. La idea supone un cambio radical en el modo de ver el fitoplancton, considerado a menudo más como un compuesto químico que como un conjunto variopinto de seres vivos con comportamientos diversos.

El trabajo de laboratorio ha confirmado no solo que se mueve verticalmente, sino también una inesperada complejidad en su comportamiento. Un grupo de investigación de la Universidad Estatal de Washington inoculó con dinoflagelados planctónicos dos depósitos de 20 metros de altura llenos con agua salada y luego introdujo copépodos herbívoros en uno. Al simular un ciclo diurno y nocturno, vieron cómo los hambrientos copépodos realizaban el esperado ascenso nocturno y el descenso diurno. El fitoplancton hizo lo contrario en ambos tanques: ascendió al ser iluminado durante el día y descendió por la noche, probablemente para captar la luz solar y reducir el riesgo de ser devorado por el zooplancton nocturno.

La sorpresa fue que las algas unicelulares que convivían con los copépodos en el depósito se hundían más que las otras, una noche tras otra, como si pusieran más distancia entre ellas y los enemigos de arriba. Nadie sabe cómo detectan el comportamiento de sus depredadores, pero, como hicieron notar los investigadores en su artículo publicado en *Marine Ecology Progress Series*: «El nuevo comportamiento aquí descrito… podría tener importantes consecuencias ecológicas».

Alterando el balance de carbono

Una de las implicaciones de la migración del fitoplancton es la atenuación del cambio climático. En 1995, Steinberg y otros investigadores estaban intentando reunir todas las piezas necesarias para calcular el balance de carbono, es decir, la relación entre la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera y la cantidad retirada de la misma, en parte por los ecosistemas marinos. Los números no cuadraban: desaparecía más carbono de la superficie del océano de la que debería. Entonces, Steinberg echó un vistazo a la oscuridad.

Como parte de su investigación en el Instituto de Ciencias Marinas de las Bermudas, Steinberg realizaba frecuentes inmersiones diurnas, por lo que estaba familiarizada con la fauna del lugar. Pero entonces, decidió hacer una inmersión nocturna. Se dejó caer por la borda de un bote que flotaba sobre 4000 metros de aguas oscuras y no tardó en reparar en que «había una comunidad completamente distinta. Me rodeaban animales de todo tipo», recuerda con voz emocionada más de un cuarto de siglo después. Aquella noche le hizo cambiar el curso de su trabajo y dedicarse al estudio de la migración vertical diaria. Y le brindó el indicio de que allí podría estar parte de la respuesta al misterio del balance de carbono.

En la superficie, el fitoplancton absorbe gran cantidad de dióxido de carbono de la atmósfera, pero gran parte es rápidamente devuelta al aire, por lo general al cabo de unos días. Cuando el zooplancton migratorio se impulsa hacia arriba durante la noche y devora esas algas marinas, crea una especie de cinta transportadora biológica que arrastra el carbono hacia el mar profundo, donde puede permanecer retenido por espacio de siglos o milenios.

Dedicado al estudio de ese movimiento crucial del carbono, Michael Stukel, biogeoquímico marino interesado en el plancton y adscrito a la Universidad Estatal de Florida, pasa mucho tiempo mirando al microscopio las excretas del zooplancton. Son pequeñas, pero se producen en tan ingente cantidad, que revisten importancia en la biogeoquímica global del océano.

Los excrementos de los migrantes verticales, ricos en carbono, se hunden en la columna de agua. Durante la caída se unen a ellos otras partículas y juntos forman la llamada «nieve marina», que acaba depositada en el lecho marino. Junto al zooplancton que nada de vuelta llevando la cena en su estómago, ese secuestro de carbono hace que el planeta «no sea tan cálido como lo sería sin ellos», afirma Stukel.

Los cálculos sobre la cantidad de carbono secuestrado por los organismos migratorios varían mucho, porque gran parte de lo que sucede durante la migración vertical diaria sigue siendo un misterio. La obtención de datos mejores redundará en modelos climáticos más fiables, lo que a su vez permitirá comprender cómo el cambio climático altera el comportamiento de estos organismos, y ello, a su vez, el clima. «Llegas a grandes preguntas sobre la humanidad y el clima, pero no puedes dar respuestas porque muchas tienen que ver con esos migrantes», lamenta Ken Buesseler, investigador de la Institución Oceanográfica de Woods Hole.

Hacer balance

Las respuestas a las grandes incógnitas sobre tales migraciones vendrán de estudios como

el que lleva a cabo el laboratorio de Kakani Katija, en MBARI. Allí se están combinando cámaras estereoscópicas y algoritmos de visión con vehículos autónomos para seguir de cerca los recorridos de ciertos migrantes. Ya son capaces de entrenar un vehículo para que, una vez en el agua, busque un animal y lo siga durante horas.

El equipo de Katija desarrolla esa tecnología para estudiar criaturas gelatinosas como los sifonóforos, cuyo aspecto recuerda a gusanos fantasmagóricos. De tejidos semitransparentes y movimientos rápidos e impredecibles, su seguimiento plantea no pocas dificultades para un vehículo autónomo, pero eso es lo que pretenden: «Tratamos de mejorar sus prestaciones», dice. Si quiere obtener imágenes y vídeos útiles, el grupo necesita un ingenio que nade y emita luz, dos cosas que interfieren fácilmente con el comportamiento de los sujetos de estudio. «Eso supone un grave problema», reconoce. Una estrategia prudente sería emplear luz roja, invisible para muchas criaturas, así como un modelo de robot que en movimiento no genere grandes turbulencias. También se baraja el uso de satélites espaciales capaces de observar la densidad de las poblaciones animales que afloran por la noche, sin riesgo de perturbación. Equipados con lídar (acrónimo inglés de detección y telemetría mediante luz) pueden penetrar hasta 20 metros en el agua.

Averiguar qué especies se mueven en cada momento y lugar exige a los especialistas peinar la columna de agua en búsqueda de las trazas genéticas de los organismos en tránsito. Un grupo de investigación sumergió desde su buque grandes botellas tomamuestras a diferentes profundidades y las dejaron a la deriva en el Golfo de México. Al mismo tiempo llevaron a cabo mediciones con sónar de la vida que había bajo ellas. Luego, secuenciaron el ADN de las muestras, para deducir qué organismos habían estado allí y cuándo. Los resultados, publicados en 2020, revelaron discrepancias con las lecturas simultáneas del sónar. Este indicaba que gran parte de la biomasa en movimiento correspondía a peces y otras especies relativamente grandes, en cambio el ADN indicaba que los copépodos y el zooplancton gelatinoso eran mucho más abundantes.

La necesidad más acuciante, y en ello están de acuerdo los investigadores, es una red global de vigilancia oceánica capaz de observar esos procesos día y noche antes de que el sistema oceánico sea perturbado por la humanidad. Por ejemplo, la pesca a gran escala se ha venido centrando en la superficie del mar y hasta tiempos recientes no se ha ampliado al fondo gracias a las artes de arrastre. Pero ahora, algunos países como Noruega y Pakistán están concediendo permisos para la franja intermedia del océano, en parte con ánimo de explotar los migrantes verticales y destinarlos a la producción de aceite de pescado y de piensos para las granjas acuícolas.

La expansión de las zonas muertas y el ascenso del mínimo de oxígeno están empujando a esas especies a los hábitats con luz diurna. Y el cambio climático está reduciendo la profundidad de la capa de mezcla en el mar abierto, con lo cual disminuye el aporte de nutrientes al fitoplancton. Y menos fitoplancton significa menos alimento para el zooplancton migratorio. Todo ello pone a estos animales bajo presión, a decir de los investigadores. «No es frecuente tener la oportunidad de estudiar un ecosistema antes de que sea explotado», dice Benoit-Bird. «Me siento como si estuviéramos corriendo contrarreloj.»

Para comprender mejor los movimientos de los billones de copépodos, krill y otros migrantes esquivos, este verano Benoit-Bird y sus colaboradores volverán al mar. Espera que su expedición con robots submarinos, sónar, imágenes y ADN ambiental le ayude a comprender cómo se organizan estos animales minúsculos durante el día, subiendo y bajando, agolpándose en enjambres o dispersándose, sin dejar de estar conectados en una red que afecta a otras muchas especies.

Mientras el día y la noche se alternen, incontables formas de vida animal seguirán las mareas verticales de luz y oscuridad en busca de sustento, modulando a la par el equilibrio entre los elementos del planeta.

Katherine Harmon Courage es periodista científica independiente y editora de *Scientific American.* Es autora de *Octopus! The most misterious creature in the sea* (Current, 2013) y *Cultured: How ancient foods feed our microbiome* (Avery, 2019).



EN NUESTRO ARCHIVO

La vida turbulenta del plancton oceánico. Antonio Turiel, Jordi Solé y Marta Estrada en *IyC*, marzo de 2010.

La aparente estabilidad de la materia orgánica en el océano profundo. Jesús M. Arrieta y Carlos M. Duarte en *IyC*, marzo de 2016.

El plancton versátil. Aditee Mita en *IyC*, junio de 2018.



INTIMIDANTE
Una hembra de pulpo manta (*Tremoctopus*) despliega su capa iridiscente. Se sospecha que la ayuda a disuadir a los depredadores, pues con ella aparenta ser más grande e intimidante. Puede alcanzar hasta 2 metros de longitud y pesar 40.000 veces más que el macho, más pequeño que una pelota de ping-pong, en uno de los ejemplos de dimorfismo sexual más notorios del reino animal.

MIKE BARTICK

EN LAS PRADERAS de fanerógamas marinas, los investigadores buscan sustancias de interés terapéutico.



LA FARMACIA DEL MAR

Stephanie Stone | Las sustancias que algunos organismos marinos producen como medio de defensa podrían convertirse en medicamentos vitales

DEVIN OKTAR YALKIN

Pedro R. L., de 75 años, recibió la noticia que él y su familia ansiaban después de seis largos ciclos de quimioterapia: la leucemia linfocítica crónica había remitido por completo. Por desgracia, cuando aún estaba en plena recuperación, contrajo la COVID-19. Ingresó en el Hospital Universitario Quirónsalud de Madrid el 30 de enero de 2021. Los tratamientos iniciales fracasaron y el 25 de febrero su situación empeoró por culpa de una neumonía grave. En ese momento, el médico responsable, Pablo Guisado, recomendó probar con la plitidepsina, un potente antivírico que es objeto de un ensayo clínico de fase 3 como tratamiento para pacientes covídicos hospitalizados.

EN SÍNTESIS

Numerosos fármacos autorizados tienen su origen en el mar, y proceden de animales invertebrados.

Antes se pensaba que los invertebrados habían creado estos compuestos como modo de defensa. Pero en las pasadas décadas se ha descubierto que la mayoría los producen microbios que viven en simbiosis en los tejidos animales.

Los investigadores se están centrando ahora en la enorme fuente de medicamentos que suponen los microorganismos marinos. La metagenómica está ayudando a identificar las moléculas de interés que estos producen.

La plitidepsina procede de un lugar por el que pocos farmacéuticos comenzarían a buscar: el fondo marino de Es Vedrà, un islote deshabitado situado frente a la costa sudoccidental de Ibiza. Corría 1988 cuando PharmaMar, una empresa farmacéutica de Madrid, organizó una expedición al lugar, un peñón escarpado que, según se cuenta, pudo inspirar la fábula recogida en *La Odisea* sobre las sirenas, cuyo canto embelesaba a los marineros atrayéndolos hacia una muerte cierta. En el curso de las inmersiones en su arrecife, rebosante de corales púrpura y de gorgonias rojas, los investigadores extrajeron un animal invertebrado de aspecto anodino en un talud rocoso de 36 metros de profundidad. Era la especie *Aplidium albicans*, un tunicado traslúcido de color amarillo pálido cuyo aspecto recuerda a un puñado de pañuelos de papel usados.



DEVIN OKTAR YALKIN

EN EL LABORATORIO DEL INSTITUTO SCRIPPS, las muestras microbianas obtenidas del medio marino se guardan en ultracongeladores.

El interés por los tunicados se explica por su modo de alimentación: bombean agua sin cesar a través de su cuerpo cilíndrico y filtran el plancton, de modo que, junto con este, ingieren virus y otros patógenos. No es de extrañar que necesiten potentes defensas químicas para mantener a raya a los microbios, lo que convierte a estos seres en una fuente interesante donde buscar medicamentos.

En 1990, PharmaMar había aislado un compuesto de *A. albicans* que demostró ser activo contra células tumorales y contra virus en cultivos de laboratorio. La empresa eligió la primera vía porque los medicamentos antineoplásicos suelen ser más rentables que los antivíricos. Después de décadas de estudios y pruebas, en 2018 Australia autorizó la plitidepsina como tratamiento del mieloma múltiple.

Cuando la pandemia de COVID-19 irrumpió, los científicos de la empresa demostraron en poco tiempo que la plitidepsina era eficaz contra el SARS-CoV-2, tanto en cultivos de laboratorio como en ratones. También superaba a otros antivíricos en los ensayos preclínicos en los que se compararon directamente los fármacos. En 2020, PharmaMar inició un ensayo clínico de fase 1-2 en pacientes hospitalizados que acabó al año siguiente. Los resultados fueron impresionantes: el 74 por ciento de los pacientes con COVID-19


DEVIN OKTAR YALKIN

ESTAS GRADILLAS DE CONGELADOR albergan 18.000 cepas microbianas recolectadas a lo largo de treinta años. Las cepas se cultivan en medios de crecimiento para analizar sus propiedades biológicas y, llegado el caso, secuenciar su genoma en busca de genes de interés.

moderada se recuperó por completo a la semana de la primera dosis. Aunque el ensayo tenía que acabar en diciembre, ya en mayo el virólogo de PharmaMar José Jimeno afirmó que la plitidepsina parecía ser superior a otros antivíricos. Su efecto en Pedro R. L. fue excepcional; con dos ciclos de tratamiento, la neumonía y el resto de los síntomas de la infección desaparecieron de raíz.

Hoy hay 21 fármacos autorizados en el mundo que tienen su origen en el mar, la mayoría obtenidos de animales invertebrados. Otro tunicado, *Ecteinascidia turbinata*, que se fija a las raíces sumergidas de los mangles, es la fuente de la mezcla de moléculas que componen Yondelis, un antineoplásico contra el sarcoma y el cáncer de ovario, y el fármaco Zepzelca, destinado a tratar el cáncer de pulmón microcítico. Una esponja negra que habita en las charcas intermareales del sur de Japón, *Halichondria okadai*, sintetiza un fármaco, ahora comercializado como Halaven, con el que se combate el cáncer de mama avanzado. Y el péptido venenoso de un cono de mar, *Conus magus*, ha derivado en Prialt, un analgésico contra el dolor crónico.

De los corales, las babosas de mar (nudibranquios), los gusanos de mar (poliquetos) y otros moluscos también se han obtenido más compuestos prometedores. «Durante los últimos 600 millones de años, estos invertebrados han estado viviendo en esa sopa de microbios como si fuera una placa de Petri», explica Drew Harvell, ecóloga marina de la Universidad Cornell, lo cual explica su necesidad de poseer defensas a toda prueba. Un litro de agua marina contiene en promedio unos 1000 millones de bacterias y 10.000 millones de virus. Si bien los científicos supusieron primero que la mayoría de los invertebrados marinos habían creado sus propias armas, durante las pasadas décadas han averiguado que la mayoría de esas sustancias defensivas son en realidad el producto de microbios que viven en simbiosis en los tejidos animales. Un ejemplo: el año pasado, un equipo del Instituto de Tecnología de Georgia dirigido por Samar Abdelrahman analizó cinco especies de babosas marinas del Mar Rojo y descubrió en ellas bacterias que producen sustancias con propiedades antibacterianas, antifúngicas y antitumorales.

Los descubridores de fármacos, que desde hace décadas se han centrado en los organismos terrestres porque resultan más familiares y de más fácil acceso, reconocen ahora que los microbios, que dominan la diversidad biológica de los mares, son la fuente con más posibilidades de



DEVIN OKTAR YALKIN



PAUL JENSEN investiga desde hace más de treinta años los compuestos marinos en busca de fármacos (*arriba*). Un científico de su laboratorio sumerge una lámina con microesferas absorbentes de resina que atraparán moléculas orgánicas disueltas en el agua de mar (*derecha*).

proveer medicamentos de origen marino. De los 23 fármacos nuevos que están en fase de ensayo clínico en este momento, 16 son microbianos y otros cuatro proceden de invertebrados que probablemente deban su resistencia a microbios simbiontes. En los últimos años se han aislado miles de compuestos prometedores de microbios marinos, cuya diversidad refleja la vasta variabilidad de las condiciones ambientales en las que viven. «En tierra firme los microbios se desecan, pues tienen problemas para mantener el equilibrio hídrico. Los mares constituyen un entorno mucho más favorable y acogedor en ese aspecto», explica Harvell.

Por desgracia, la autorización de la mayoría de los fármacos marinos ha tardado décadas, en parte por la financiación insuficiente y en parte por lo difícil y laborioso que resulta el aislamiento, los ensayos y la producción de cantidades sustanciales de los nuevos compuestos. Afortunadamente, los recientes progresos en los campos de la genómica, la bioquímica y la informática han mejorado la selectividad y la eficacia a la hora de buscar medicamentos vitales procedentes del mar.

Dianas génicas

En 1989, Paul Jensen extrajo sedimentos del fondo del mar de las Bahamas y los llevó a su laboratorio en el Instituto Scripps de Oceanografía para buscar en ellos bacterias que pudieran ser útiles en medicina. No fue coser y cantar: el primer problema radicaba en cultivar las bacterias en unas condiciones de laboratorio que se asemejaran a las del mar. Si alguna especie crecía, tenía que convencerla para que produjese por lo menos un puñado de moléculas de su arsenal, aunque no estuviera expuesta a los mismos estímulos que recibía en su ambiente natural.

A pesar de esos obstáculos, Jensen acabó descubriendo una nueva especie de bacteria, *Salinispora tropica*, que producía una molécula antitumoral novedosa. De ese compuesto, comercializado con el nombre de marizomib, acaba de concluir un ensayo de fase 3 contra el glioblastoma, un mortífero tumor cerebral que reduce la esperanza de vida de quien lo contrae a unos quince meses desde el diagnóstico. Actualmente está a la espera de ser autorizado por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA). El marizomib es un claro ejemplo de las posibilidades que ofrecen las bacterias marinas en cuanto a nuevos medicamentos, pero el proceso ha tardado más de tres décadas, lo que ha llevado a Jensen y a otros a buscar estrategias mejores.

A inicios de la década de 2000, la genómica transformó su trabajo. Las primeras secuencias

enteras de genomas microbianos marinos, entre ellas la de *S. tropica*, revelaron que las especies que producen muy pocos compuestos cuando se cultivan en el laboratorio podrían fabricar muchos más; el ADN de algunas alberga docenas de conglomerados de genes que codifican sustancias. En pocos años, la metagenómica, es decir, la secuenciación del ADN perteneciente a comunidades enteras de organismos contenidas en una muestra, ha revelado un potencial oculto aún mayor. Se comienzan a encontrar conglomerados de genes codificantes de compuestos en especies que no se han cultivado jamás en el laboratorio.

Jensen ya anda en busca de moléculas, en lugar de los microbios que las sintetizan. El año pasado su equipo se adentró a pie cuatro veces en las praderas marinas que crecen frente a la península de Point Loma, en San Diego, para sumergir láminas de microperlas absorbentes de resina, que atrapan moléculas orgánicas disueltas en el agua de mar. De vuelta al laboratorio, Jensen analiza las muestras en busca de compuestos bioactivos (sustancias que ejercen una acción en los seres vivos).

Ya ha dado con algo: un compuesto dotado con una estructura de carbono inusual que contiene un grupo de moléculas reactivas a enzimas. Jensen cree que podría funcionar «como algo parecido a la ojiva explosiva de un proyectil». Esa estructura novedosa actuaría de modo muy distinto al de los medicamentos existentes. «Creo que matará las células. Ahora esperamos deducir cuál es su diana.»

El paso siguiente será identificar al artífice de la sustancia. Enormes bases de datos con el genoma de microbios marinos y compuestos bioactivos, junto con la potencia de cómputo necesaria para encontrar interrelaciones entre ellos, permiten ya vincular las sustancias de interés con los genes.

Una pionera de esa estrategia es Katherine Duncan, bioquímica especializada en microbiota marina de la Universidad de Strathclyde, en Glasgow, que la denomina prospección genómica basada en patrones. La técnica hace poco que es factible: «Antes carecíamos de las herramientas necesarias para comparar bases de datos de semejante tamaño».

Duncan analiza con ella los testigos de sedimentos oscuros extraídos del fondo abisal del océano, a 4000 o 4500 metros de profundidad frente a la costa de la Antártida. Los resultados preliminares revisten sumo interés: las muestras contienen por lo menos dos nuevas bacterias marinas que sintetizan antibióticos: *Pseudonocardia abyssalis* y *Pseudonocardia oceani*. En tierra, otros miembros pertenecientes a ese



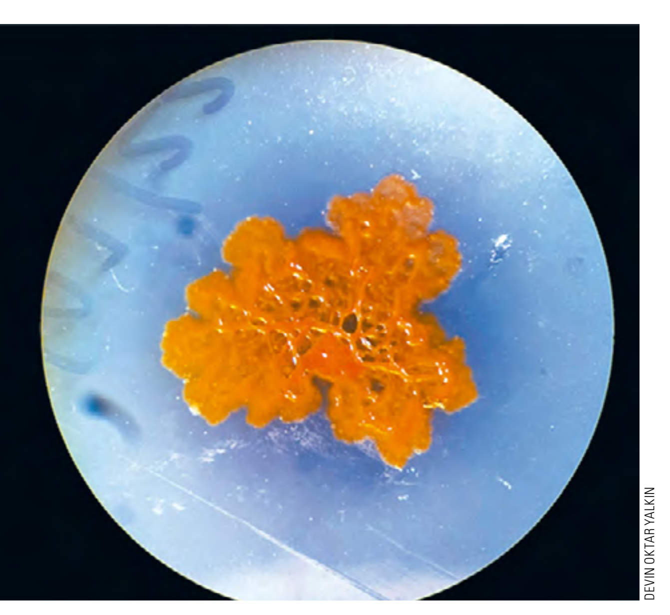
DEVIN OKTAR YALKIN

ESTE INVERTEBRADO MARINO capturado por un sumergible a gran profundidad (2500 metros) en el sur de California permanece congelado a la espera de ser identificado.

mismo género viven en simbiosis con hormigas cultivadoras de hongos, y producen moléculas antibacterianas y antifúngicas que impiden que los patógenos invadan los huertos de hongos en los hormigueros. No se requiere una gran imaginación para pensar que los primos del mar puedan ofrecer fármacos antiinfecciosos.

Uno de los mayores desafíos que Duncan y Jensen, entre otros, encaran es saber qué moléculas descubiertas merecen atención. Nadine Ziemert, microbióloga de la Universidad de Tubinga, ha diseñado una herramienta que convierte la prospección de los genomas en un proceso más selectivo por medio del análisis de los genes responsables de la resistencia a los antibióticos. Todo microorganismo que produzca una molécula tóxica tiene que disponer de un mecanismo que lo proteja de su propia arma; por norma general, se trata de una copia modificada de la diana celular de la toxina que la hace resistente a su ataque.

La creación de Ziemert, llamada «Buscador de dianas de resistencia a los antibióticos», permite acceder a una base de datos compuesta por más de 10.000 genomas bacterianos —o incorporar los que tenga un investigador— y emprender la búsqueda de genes de resistencia relacionados con funciones concretas de las células. La base de datos ganará en utilidad conforme crezca, sobre todo si se aceleran los proyectos de secuenciación de los genomas de bacterias extremófilas, que habitan en entornos poco explorados. El buscador de dianas de Ziemert ha arrojado tan buenos resultados que la empresa emergente Hexagon Bio ha diseñado otro similar para prospectar genomas de hongos en busca de compuestos prometedores.



DEVIN OKTAR YALKIN

ESTA COLONIA DE BACTERIAS MARINAS del género *Salinispora* que crece en una placa de cultivo segrega una molécula que destruye células tumorales. El marizomib, como así se llama, acaba de completar los ensayos clínicos de fase 3 contra el glioblastoma, un tumor cerebral mortífero.

Nuevos antibióticos

La prospección genómica dirigida no podía haber aparecido en un momento mejor. La pandemia de COVID-19 ha puesto de manifiesto lo importante que es contar con una reserva de fármacos más cuantiosa con que tratar las nuevas enfermedades infecciosas. También existe una necesidad apremiante de nuevos medicamentos contra las antiguas ya conocidas. Numerosas infecciones bacterianas, como la neumonía, la tuberculosis, la gonorrea, la septicemia y diversas toxiinfecciones alimentarias, son ahora más difíciles de tratar y, en ciertos casos, han devenido incurables por la aparición de la resistencia a los antibióticos. Las autoridades de salud pública reconocen en este fenómeno una de las mayores amenazas que afronta la humanidad.

Dado que casi todos los antibióticos proceden de microbios terrestres, parece lógico que los marinos, en gran medida desconocidos, despierten grandes esperanzas ante esta crisis. A Richard Payne, químico de la Universidad de Sídney, le entusiasma sobre todo su capacidad para combatir la tuberculosis, causada por *Mycobacterium tuberculosis*. «Durante el último decenio, la tuberculosis ha sido la enfermedad infecciosa más mortífera, y la inversión de todos los esfuerzos en la COVID-19 ha supuesto un retroceso en su control», advierte. Se necesita un antibiótico que tenga como diana una proteína del bacilo tuberculoso distinta de la que tienen otros fármacos.

Y eso es exactamente lo que Payne ha encontrado en una bacteria de la playa de Shinyang en la isla de Jeju, en Corea del Sur, conocida sobre todo por sus condiciones ideales para la práctica del *windsurf* y del *kitesurf*. El compuesto, la ohmyungsamicina A, impide que *M. tuberculosis* elimine adecuadamente sus desechos proteicos, lo que acaba matando a la célula. Y cuando Payne creó una serie de análogos químicos (moléculas sintetizadas en el laboratorio con pequeñas alteraciones y que pueden producirse en grandes cantidades) uno de ellos demostró tal potencia

que exterminó por completo una colonia cultivada del bacilo tuberculoso en tres días. Ya ha demostrado su eficacia en peces cebra infectados y han dado comienzo los ensayos con ratones.

El descubrimiento y el desarrollo de nuevos antibióticos ha recaído en gran medida en los círculos universitarios durante las décadas pasadas, porque este tipo de medicamentos se venden a precios tan económicos que no suponen ningún incentivo para que las empresas farmacéuticas inviertan en ellos. Lo mismo se puede decir de los tratamientos contra numerosas enfermedades tropicales desatendidas, como el paludismo. En 2012, William Gerwick, químico del Instituto Scripps, aisló la molécula carmaficina B de una masa de cianobacterias que crecía sobre un cabo de fondeo, en una bahía de Curazao. Ha sintetizado artificialmente una serie de análogos que ha ensayado contra células tumorales, una primera línea de investigación habitual.

Los resultados no fueron espectaculares, así que Gerwick centró su atención en otros proyectos. Sin embargo, hace poco un colega le sugirió probar esos análogos contra los parásitos causantes del paludismo y, esta vez sí, los resultados sorprendieron a todos. «Uno reaccionó de forma extraordinaria contra el parásito», afirma Gerwick. Además, resultó inocuo para las células humanas.

Gerwick dispone ahora de financiación para estudiar la carmaficina B como un nuevo antipalúdico. Se acabe convirtiendo o no en un medicamento a la venta, el descubrimiento es un recordatorio de las posibilidades que atesoran los millares de sustancias bioactivas marinas que la ciencia ha descubierto ya.

La carmaficina B es un recordatorio también de que los avances técnicos no nos darán fármacos nuevos por sí solos; a menudo se precisa una pizca de suerte y la voluntad de sacar provecho del hallazgo. El día que Joshawna Nunnery, antigua estudiante de Gerwick, tomó la muestra de cianobacterias de aquel cabo sumergido, tenía previsto bucear en otro sitio. Pero su compañero de laboratorio y pareja de inmersión había contraído el dengue, de modo que tuvo que cancelar los planes y decidió bucear con esnórquel cerca de la estación de investigación.

Gracias al crecimiento de las inversiones en la exploración marina, cada vez son más las oportunidades de realizar esos descubrimientos fortuitos. En una expedición reciente al archipiélago de las Phoenix, en el centro del océano Pacífico, a bordo del *Falkor*, el buque de investigación del Instituto Oceanográfico Schmidt, Anna Gauthier fue una de las primeras en obtener muestras de bacterias de las profundidades en esas islas. Esta doctoranda de la Universidad Harvard planeaba llevar a cabo experimentos inmunitarios durante la expedición, de modo que no congeló de inmediato las bacterias que sacaba del mar, como suele procederse. En lugar de ello, comenzó el cultivo a bordo.

La técnica reportó una ventaja inesperada: la viabilidad de los cultivos fue muy superior a la que se observa en los cultivos de muestras descongeladas. El ochenta por ciento de las bacterias que crecieron eran tan distintas de las que se encuentran en los mamíferos que no desencadenaron una respuesta inmunitaria por parte de las células de mamífero. El descubrimiento dista de ser un avance médico por ahora, pero ha causado expectación por las posibilidades que abren en el campo de la inmunoterapia y de las vacunas.

La esperanza de contar con nuevos medicamentos esenciales, aunada con las crisis de salud pública que se vislumbran en el horizonte, supone un gran acicate para los científicos como Duncan. «Conozco personas que han sido tratadas con los antibióticos de último recurso, sin éxito. Mi abuela murió de septicemia. Todo el mundo tiene vivencias como esta», se sincera.

Ella espera que esas vivencias puedan cambiar en la década próxima. «El mar es un gran desconocido», concluye con asombro. La próxima plitidepsina aguarda en algún confín del océano. O podría estar ya en un laboratorio.

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre Biología marina, nuestro monográfico digital (en PDF) que recoge los mejores artículos de *Investigación y Ciencia* sobre las adaptaciones de los organismos marinos y su importancia en el ecosistema.



Stephanie Stone, periodista científica premiada y productora de vídeos, escribe sobre biodiversidad, sostenibilidad y salud humana. Es una de las fundadoras de la revista *bioGraphic*.



EN NUESTRO ARCHIVO

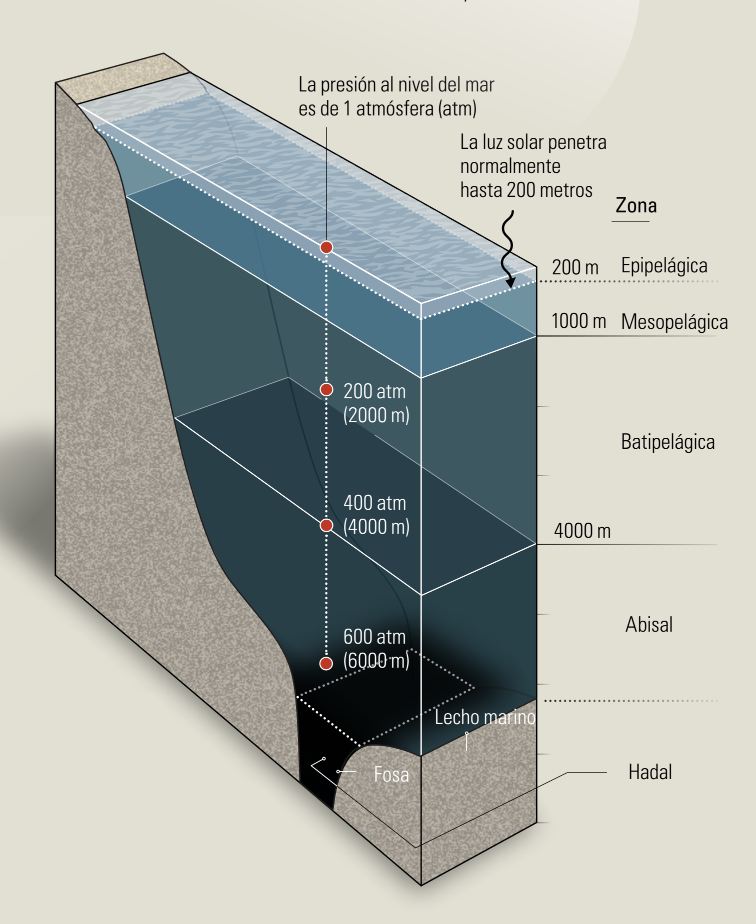
Productos naturales de origen marino. José C. Jiménez, Carmen Cuevas y Fernando Albericio en *IyC*, febrero de 2007.

¿Es posible salvar los corales? Rebecca Albright en *IyC*, marzo de 2019.

MARES DINÁMICOS

Mark Fischetti, Kelly J. Benoit-Bird, Skye Morét y Jen Christiansen |

Un conjunto detallado de datos físicos y químicos está ofreciendo una nueva visión del mar



Si en Internet buscamos «zonas del océano», veremos cientos de ilustraciones que muestran el mismo perfil vertical. La delgada capa superior corresponde a la zona epipelágica, o fótica, a la que llega luz solar suficiente para que el fitoplancton, las algas y algunas bacterias lleven a cabo la fotosíntesis. Por debajo se sitúa la zona mesopelágica, donde la luz desvaneciente aún permite que algunos animales vean; muchos emiten luz propia mediante la bioluminescencia. A continuación, se halla la zona batipelágica, sin luz detectable, seguida por los abismos gélidos de la zona abisal. Por último, en el lecho marino se abren fosas y cañones aún más profundos que conforman la zona hadal (nombre derivado de Hades, dios griego del inframundo).

En esta visión clásica, la cantidad de luz y la presión del agua (que aumenta con la profundidad) condicionan las formas de vida que habitan en cada zona. Sin duda, esos factores son importantes, pero también lo son la temperatura, la salinidad, la cantidad de oxígeno y nitrógeno y las corrientes cambiantes. Los datos recopilados en todo el mundo indican que la dinámica de los mares y de la vida marina es mucho más compleja de lo previsto, así que nos deparan más y más sorpresas conforme ahondamos en ellos.

MARK FISCHETTI (*edición*); KELLY J. BENOIT-BIRD, CATEDRÁTICA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL ACUARIO DE LA BAHÍA DE MONTERREY (*asesoría*); SKYE MORÉT Y JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

NUEVA VISIÓN DEL MAR

La Tierra tiene un océano interconectado. Los datos de cinco lugares situados en distintas latitudes y a diferentes distancias de la costa indican las diferencias de temperatura, salinidad, oxígeno y nitrógeno (un nutriente esencial para las plantas y los animales) que hay en los océanos.

Atlántico Norte
Superficie
Profundidad
1000 metros
2000 m
3000 m
4000 m
Datos de nov. 2003

Océano Índico
4000 m
5000 m
Datos de ene. 2004

Océano Austral
Datos de ago. 2005

Pacífico Central
3000 m
4000 m
5000 m
6000 m
Datos de dic. 2005

Costa de California
1000 m
2000 m
3000 m
Datos de mayo 2007

SALINIDAD

El Atlántico Norte es el océano más salado, sobre todo cerca de la superficie. Los vientos alisios se llevan el agua que se evapora de la superficie; y desde el Mediterráneo y el Ártico (donde la sal se concentra cuando el agua se congela) afluyen corrientes muy saladas.

Salinidad, en unidades prácticas de salinidad (ups)

33,2 — 36,7
Baja — Elevada

NITRÓGENO

Las aguas superficiales tienden a ser pobres en este elemento porque es consumido por las abundantes algas y fitoplancton que habitan allí. En el océano Austral, donde la densidad del agua es más uniforme de arriba abajo, el nitrógeno se distribuye de forma más homogénea.

Cada esfera indica una medición a esa profundidad; en los primeros cientos de metros de la columna de agua se han hecho más mediciones.

42,7 micromoles por kilogramo
0,04 μmol/kg

TEMPERATURA

El agua caliente alcanza notables profundidades en las regiones ecuatoriales, como en el Índico. La transición entre las aguas superficiales calientes y las profundas frías se está situando cada vez más a menor profundidad en dirección a los polos. En promedio, la temperatura de los primeros 700 metros de océano en el mundo ha aumentado unos 0,8 °C desde 1971.

0,5 °C — 26,1 °C
Fría — Caliente

OXÍGENO DISUELTO

El agua caliente alberga poco oxígeno, así que las aguas superficiales suelen contener menos. Las profundas del océano Pacífico son algunas de las más antiguas del planeta y presentan una cantidad de oxígeno aún menor por su escasa renovación. Por contra, el océano Austral es tan frío que alberga mucho más por unidad de volumen. En los últimos 50 años, el oxígeno marino ha descendido en promedio un 2 por ciento en todo el mundo, si bien los valores en algunas regiones tropicales han caído hasta un 40 por ciento; gran parte del descenso afecta a las aguas profundas, donde la descomposición de los organismos muertos consume el gas.

Cada burbuja representa una muestra analizada procedente de una profundidad concreta.

316 μmol/kg
11 μmol/kg

PENETRACIÓN DE LA LUZ

La luz solar determina la profundidad a la que es posible la fotosíntesis, pero una gran abundancia de organismos y de sus productos de desecho pueden impedir el paso de la luz. La profundidad a la que penetra depende del lugar y de la estación del año.

COLOR DE LA SUPERFICIE

El azul del mar es una visión atrayente, pero el color de la superficie varía notablemente en todo el planeta. Cuanto mayor es la concentración de fitoplancton, lleno de clorofila, más verdosa es. Y cuanto mayor es la producción biológica de una región, más turbia es el agua.

Clorofila de la superficie (miligramos por metro cúbico)
0,01 — 20

AFLORAMIENTO

El mar varía a lo largo del tiempo y del espacio. En las costas occidentales de los continentes, los vientos constantes que recorren las orillas, combinados con la rotación de la Tierra, empujan el agua de la superficie mar adentro, lo que permite el ascenso de las aguas profundas. El «afloramiento» situado a lo largo de la costa de California impulsa el agua fría y rica en nutrientes, como los nitratos, hacia la superficie, donde alimenta el fitoplancton, que consume el oxígeno. Los vientos suelen soplar de 7 a 10 días antes de amainar, lo que permite que el agua de la superficie vuelva a calentarse.

Estado relajado
Episodio de afloramiento (entre 7 y 10 días)

Salinidad | Nitrato | Temperatura | Oxígeno

Superficie
5 m
10 m
20 m
30 m
60 m
80 m
100 m

	Salinidad	Nitrato	Temperatura	Oxígeno
	ups	μmol/kg		μmol/kg
Máximo	34,09	31,9	12,1 °C	280,2
Mínimo	33,22	2,5	8,5 °C	60,1

VIDA BULLICIOSA

Las aguas profundas situadas bajo la zona fótica constituyen más del 90 por ciento del espacio habitable del planeta. En ellas medran las mayores comunidades animales, tanto en biomasa como en cantidad de individuos. Se calcula que las aguas oscuras podrían albergar un millón de especies desconocidas para la ciencia.

CINTA TRANSPORTADORA PLANETARIA

Gigantescas masas de agua de igual densidad circulan lentamente siguiendo un camino trazado. El agua salada y fría de la superficie del Atlántico Norte, rica en oxígeno pero pobre en nutrientes, se hunde y circula sobre el fondo marino, primero hacia el océano Índico y después hacia el Pacífico, en un circuito que dura hasta mil años. Por el camino, los organismos consumen el oxígeno y aportan nutrientes cuando mueren, lo que genera las aguas hipóxicas pero ricas en nutrientes de los fondos oceánicos, en especial del Pacífico.

Atlántico Norte
Océano Índico
Pacífico Central
Océano Austral
Costa de California

FUENTES: «WORLD OCEAN ATLAS 2018», TIM P. BOYER ET AL., NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. CONSULTADO EN JUNIO DE 2022 (*datos representados gráficamente en columnas*); «GLOBAL MAPS OF FOREL–ULE INDEX, HUE ANGLE AND SECCHI DISK DEPTH DERIVED FROM 21 YEARS OF MONTHLY ESA OCEAN COLOUR CLIMATE CHANGE INITIATIVE DATA», JAIME PITARCH ET AL. EN *EARTH SYSTEM SCIENCE DATA*, VOL. 13, 2021 (*zona fótica*); «A WORLD OF CHLOROPHYLL», IMAGEN CREADA POR JESSE ALLEN, DEL NASA EARTH OBSERVATORY, CON LOS DATOS FACILITADOS POR EL PROYECTO SEAWIFS, CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD DE LA NASA Y ORBIMAGE (*color de la superficie marina*); «THE GLOBAL IMPORTANCE OF THE SOUTHERN OCEAN AND THE KEY ROLE OF ITS FRESHWATER CYCLE», MICHAEL P. MEREDITH EN *OCEAN CHALLENGE*, VOL. 23, 2019 (*cinturón mundial de corrientes*)



El REY DEL BUCEO
El pingüino rey anida en colonias multitudinarias en las islas subantárticas, a veces formadas por cientos de miles de individuos. No construye un nido, sino que se limita a empollar los huevos colocados sobre sus pies. El macho se encarga del primer turno de incubación, que puede durar semanas, mientras la hembra se adentra en el mar en busca del sustento merecido. De hasta un metro de altura, es el segundo mayor de los de su clase, solo superado por el pingüino emperador.

TUI DE ROY/MINDEN PICTURES

EL *ORPHEUS*, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, puede maniobrar a las mayores profundidades de forma autónoma y en grupos de vehículos, así como posarse sobre el fondo para tomar muestras.

VIDA EN EL OCÉANO PROFUNDO

Timothy Shank | Los nuevos hallazgos en el fondo marino nos obligan a revisar nuestra visión sobre la vida

EVAN KOVACS/© INSTITUCIÓN OCEANOGRÁFICA DE WOODS HOLE

Durante más de cincuenta años, la exploración del océano profundo ha sido una fuente continua de descubrimientos que han hecho cambiar nuestra comprensión de la vida en el océano, en tierra firme e incluso fuera de nuestro planeta. Así lo ilustran los tres acontecimientos siguientes.

El 16 de octubre de 1968, el cable que unía el submarino *Alvin* a un buque oceanográfico se rompió a 1000 millas de Nantucket, en Massachusetts. Los tres miembros de la tripulación lograron escapar sanos y salvos, pero el submarino se hundió hasta el lecho marino, a más de 5000 metros de profundidad. Casi un año más tarde, cuando se reflotó el *Alvin*, la sorpresa fue mayúscula al comprobar que el almuerzo de la tripulación, compuesto de sándwiches y manzanas guardados en un recipiente de plástico, se había conservado extraordinariamente bien. Las pruebas bacteriológicas y biológicas corroboraron esa primera impresión. Incluso hubo quien se atrevió a probarlo. Experimentos posteriores realizados en el laboratorio de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, desde donde escribo este artículo, demostraron que la degradación microbiana de las muestras analizadas era entre diez y cien veces más lenta de lo esperado. Este descubrimiento, junto a otros, llevó a la conclusión de que la tasa metabólica y el crecimiento de los organismos del mar profundo eran muy inferiores a las de especies similares de la superficie del océano.

En 1977, los investigadores a bordo del restaurado *Alvin* realizaron otro descubrimiento histórico: la primera observación de vida en torno a un manantial hidrotermal caliente que se elevaba del fondo marino. Aquella visión derribó la creencia, largo tiempo sostenida, de que la toda la red trófica del planeta dependía de la fotosíntesis, el mecanismo que permite emplear la energía de la luz solar para convertir el agua y el dióxido de carbono en carbohidratos complejos y oxígeno. Los organismos hidrotermales, y todo su ecosistema, proliferaban en la oscuridad más absoluta. Transformaban los compuestos disueltos en el agua de la surgencia en otros capaces de sustentar la vida mediante un proceso conocido hoy como quimiosíntesis.

Por si esto no fuera lo bastante sorprendente, una expedición en la que participé en 1993 reveló un error de concepto. Descubrimos una gran surgencia hidrotermal en la dorsal del Pacífico Oriental. La estructura había sido destruida por una erupción submarina unos pocos años antes, pero había sido recolonizada y bullía nuevamente de vida. Los sándwiches se estropeaban con lentitud en el fondo marino y todavía eran comestibles al cabo de un año, pero los procesos biológicos del océano profundo también podían ser muy rápidos.

Cada nuevo descubrimiento que derriba un antiguo dogma refuerza una verdad mucho mayor: el océano es mucho más complejo, y está mucho más conectado con nuestra vida, de lo que nunca habíamos imaginado. Durante la mayor parte del siglo XX, los científicos sostenían que el océano profundo era un lugar inhóspito y monótono, en perpetua oscuridad, sometido a temperaturas frígidas, con poco alimento y una presión enorme, todo lo cual hacía imposible la existencia de formas de vida complejas. Pero los nuevos instrumentos de observación, medición y muestreo del océano profundo, como los vehículos submarinos cada vez más sofisticados, dotados de cámaras de alta definición, han demostrado que la diversidad de las profundidades más oscuras puede rivalizar con la de los bosques tropicales y los arrecifes coralinos. Estas expediciones han demostrado que el mar profundo no es uniforme en absoluto; así como Australia es el hábitat de los canguros y Asia es la tierra del tigre, el océano profundo alberga regiones biográficas evolutivamente diferenciadas.

Empezamos a darnos cuenta de cuán conectados estamos con estos dominios. A medida que los efectos de la actividad humana se hacen notar a mayor profundidad, se prevén rápidos cambios tridimensionales en la temperatura, la salinidad y la concentración de oxígeno del océano profundo, así como en las corrientes y remolinos que definen las fronteras entre sus diferentes regiones. Las langostas han empezado a desplazarse hacia aguas más profundas y frías y a cambiar la temporada de muda. Peces de fondo de importancia comercial, como el bacalao y el eglefino, están migrando hacia los polos en búsqueda de hábitats más adecuados.

Estamos comprobando que las fronteras biogeográficas no son inmutables ni escapan al impacto humano. Diversos estudios han demostrado que más de la mitad de los organismos hadales, aquellos que habitan las zonas más profundas, situadas a más de 6000 metros, presentan plástico en el tubo digestivo. Los policlorobifenilos (PCB),

prohibidos en Estados Unidos desde 1979 e internacionalmente desde 2001 como resultado de la Convención de Estocolmo, son aún comunes en los tejidos de los organismos de las zonas más recónditas.

También estamos aprendiendo que la vida en las profundidades puede llevarnos a nuevos descubrimientos. Los peces que allí habitan producen moléculas que permiten el correcto plegamiento de las proteínas a una presión hidrostática equivalente a unos 100.000 kilopascales. La investigación médica ha demostrado que algunas de esas moléculas podrían ayudar al tratamiento del alzhéimer, enfermedad caracterizada por el plegamiento defectuoso de ciertas proteínas. Además, descodificar los genes que gobiernan las características de los organismos del mar profundo, como los que evitan los errores en la replicación, transcripción y traducción del ADN, podrían emplearse en tratamiento del cáncer y otras enfermedades.

El mayor paradigma que la exploración del océano profundo podría derribar es la creencia de que, en todo el universo, solo la Tierra alberga vida. Esta podría haber existido en Marte mientras contuvo agua líquida; y el hecho de que ambos planetas compartan material eyectado en el pasado implica que podrían haber intercambiado los componentes moleculares esenciales para construir la vida. Pero el descubrimiento de la vida quimiosintética en la Tierra y la constatación reciente de que podrían existir hasta 13 océanos de agua líquida bajo la superficie helada de Europa y Encélado (lunas respectivamente de Júpiter y Saturno, demasiado alejadas de la Tierra como para haber intercambiado con ella en el pasado los componentes moleculares necesarios para la vida) sugiere la posibilidad de un segundo origen independiente de la vida. Y si esta apareció dos veces en el sistema solar, entonces podría existir en cualquier lugar del cielo al que miremos.

Timothy Shank, biólogo, dirige el Laboratorio de Ecología Molecular y Evolución de la Institución Oceanográfica Woods Hole y colidera el Proyecto Genomas del Océano Profundo.



EN NUESTRO ARCHIVO

Trofismo póstumo en el océano. Crispin T.S. Little *IyC*, abril de 2010.
Simbiosis microbianas. Jeffrey Marlow y Rogier Braakman *IyC*, junio de 2019.
Vida en las profundidades del subsuelo marino. Jordana Cepelewicz en *IyC*, junio de 2021.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes, Enigmas del fondo marino, El misterio del mar lechoso* (ed.), *El lecho marino, palmo a palmo, Migración sigilosa* (ed.), *La farmacia del mar* y *Mares dinámicos*; **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes* y *Los minerales, cápsulas del tiempo*; **Luis Cardona:** *El misterio del mar lechoso* (trad.), *Migración sigilosa* (trad.) y *Vida en el océano profundo*; **Miguel A. Vázquez-Mozo:** *Tensiones cosmológicas;* **Xavier Roqué:** *Pasados pandémicos, futuros pandémico*; **Rosa Pujol:** *Traumas intergeneracionales*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

HISTORIA DE LA CIENCIA

PASADOS PANDÉMICOS, FUTUROS PANDÉMICOS

Fuentes, historias, imaginaciones

Lubna Shaheen Abdul Parveen

La pandemia causada por el coronavirus ha afectado profundamente nuestras vidas, tanto a nivel cotidiano como global: nuestra manera de relacionarnos, nuestro entorno laboral, el sistema alimentario y sanitario, etcétera. Su impacto sobre nuestro futuro está todavía por determinar. Por un lado, las noticias que recibimos a menudo muestran que este asunto no acabará con la COVID-19. La emergencia de nuevas enfermedades, como el más reciente caso del brote de viruela del mono, nos advierte de la amenaza probable de nuevas pandemias en el futuro. Por otro lado, mirando hacia el pasado, encontramos diversos casos de pandemias, como las oleadas recurrentes de peste, cólera, fiebre amarilla o gripe, que han causado estragos en la población.

Este paralelismo entre pasado, futuro y presente, y el impacto de la actual pandemia de COVID-19, ha reavivado el interés por la historia de las pandemias, cuestionando la manera en que tal conocimiento podría contribuir a entender, explicar y prevenir pandemias presentes y futuras.

La Sociedad Catalana de Historia de la Ciencia y de la Técnica (SCHCT) y el Instituto Menorquín de Estudios (IME) dedicaron su undécima Escuela de Primavera de Historia de la Ciencia y la Divulgación a esta cuestión. Bajo el título «Pasados pandémicos, futuros pandémicos. Fuentes, historias, imaginaciones» (que da título también a esta reseña), la escuela se propuso revisar el pasado y pensar el futuro ante una crisis sociosanitaria como la actual, con la convicción de que la historia no concierne únicamente al pasado.

Con un enfoque interdisciplinar que combinaba enfoques históricos, antropológicos y artísticos, el encuentro tuvo lugar en Mahón el pasado mes de mayo. Se exploró el tema principalmente desde tres perspectivas diferentes, pero a la vez complementarias, cada una de las cuales dio nombre a un taller: historias, fuentes e imaginaciones. Tres maneras de conectar el pasado y el futuro. Pero antes de adentrarnos en las ideas y discusiones que tuvieron lugar en el marco del encuentro, vale la pena que nos fijemos en el sitio donde se celebró: el Lazareto de Mahón.

Qué son los lazaretos

El término «cuarentena» tiene su origen en el mundo de la navegación, ya que, hasta principios del siglo xx, fue uno de los principales escenarios de difusión de enfermedades infecciosas (como la peste, el cólera, la fiebre amarilla o la sífilis) transportadas por marineros, pasajeros y mercancías procedentes de lugares remotos.

El estallido de la gran peste negra, que devastó las poblaciones europeas, asiáticas y norteafricanas, conllevó la adopción por primera vez de medidas de cuarentena en Europa, concretamente en el puerto de Ragusa (actual Croacia), en 1377. La crisis reveló la necesidad de establecer lazare-



Vista del lazareto de Mahón.

tos, sitios permanentes dedicados al aislamiento y cuarentena de mercancías, tripulaciones y viajeros sospechosos de padecer enfermedades contagiosas. En 1403 se construyó en Venecia el primer lazareto de Europa, en la Isla de Santa María de Nazaret.

La construcción de lazaretos se generalizó como medida de protección frente a las amenazas que podía suponer el tráfico marítimo. A finales del siglo XVIII se resolvió establecer un lazareto en el puerto de Mahón, en la isla de Menorca. Esta «fortaleza sanitaria» estuvo en funcionamiento desde 1807 hasta 1917, y se convirtió en un lazareto de referencia internacional. La celebración del encuentro de la SCHCT en este recinto dedicado al control sanitario durante más de un siglo adquiere así un especial relieve.

Como afirma Mark Honigsbaum, historiador especializado en enfermedades infecciosas y profesor invitado de la Escuela, «acabamos de recibir una llamada de atención global: las enfermedades infecciosas no son solo algo del pasado. La historia de las epidemias revela cómo eran las sociedades en las que se produjeron, cuáles eran sus tradiciones y sus vidas cotidianas, sus ideas sobre las enfermedades epidémicas, sus mecanismos de gestión y relación... Básicamente, es otra manera de reconstruir su fascinante historia».

Futuro pasado: el papel del historiador

Francisco Javier Martínez, historiador de la ciencia de la Universidad de Zaragoza y organizador de la Escuela de Primavera, afirmó en el discurso inaugural que la pandemia de COVID-19 puede considerarse una llamada ineludible a revisar el pasado de las pandemias y a reimaginar sus futuros. Una fuente de inspiración del encuentro fue el libro *Futuro pasado*, del historiador Reinhard Koselleck, que argumenta que las acciones y percepciones del presente están influenciadas por la tensión que existe entre las «experiencias» (el pasado) y las «expectativas» (el futuro). Las experiencias corresponden al conjunto de eventos pasados que llamamos memoria, mientras las expectativas son un pronóstico de cosas por venir y construidas por la imaginación. De esta manera, los historiadores, al construir nuevas visiones del pasado, al mismo tiempo están proponiendo nuevas visiones para el futuro. En el caso del estudio histórico de las pandemias, por ejemplo, el propio hecho de volver a mirar su papel en la historia y reflexionar sobre ello modifica nuestra perspectiva sobre la situación actual y su probable evolución.

El primer taller («Historias») estuvo dedicado precisamente al análisis de la relación entre el pasado, el presente y los futuros, cuestionando a la vez el rol de los historiadores en la crisis actual. Para Iris Borowy, de la Universidad de Shanghái, el papel del historiador es mostrar cómo está hecho el mundo: «Somos historiadores, no profetas. A muchos de nosotros no nos gusta que nos pregunten "¿Qué lecciones podemos extraer del pasado?" No obstante, podemos explicar que el mundo en que vivimos, que incluye retos

En uno de los talleres del encuentro, los historiadores tuvieron la oportunidad de explorar el lenguaje del arte. Se les pidió que propusieran lemas de dos palabras, evocadas por experiencias del presente y del futuro. Las creaciones se proyectaron luego en la fachada de la Iglesia del Carmen de Mahón, en el marco del proyecto Misterio Diáfano, una iniciativa de intervención artística en el espacio público promovida por el colectivo Mito.



JÚLIA MASSÓ

actuales y de futuro, es producto de decisiones tomadas en el pasado. [...] Creo que esta es la mayor responsabilidad del historiador de la ciencia, mostrar cómo está hecho el mundo».

Honigsbaum insistió en esta función peculiar del historiador y en los cambios que ha causado la pandemia en su definición: «lo que hemos visto coincide con lo que sabíamos de otras pandemias. Estas revelan las relaciones sociales subyacentes y las desigualdades en salud, y hacen aflorar las crisis sociales y políticas. Reconocer y transmitir estos patrones podría ser una de las funciones de la historia de la medicina».

En el segundo taller («Fuentes») se exploró la conexión histórica entre pandemias a través de la cuestión metodológica de las fuentes. Desde el inicio de la pandemia de COVID-19 hemos sido testigos de numerosas iniciativas destinadas a documentarla. Alexandre Faye, bibliotecario y archivista web de la Biblioteca Nacional de Francia (BnF), explicó su labor en un proyecto de la BnF dedicado a la recopilación de contenidos digitales relacionados con la epidemia de COVID-19 y la actual crisis sanitaria y social. Por otro lado, Helena da Silva, del Instituto de Historia Contemporánea de la Universidad Nueva de Lisboa, presentó el proyecto Memória COVID, que está documentando el impacto de la pandemia en curso mediante la recopilación de contenido digital (vídeos, fotografías, carteles, sonidos, historias personales, diarios, etcétera) que la gente va subiendo a la página web del proyecto.

La abundancia de datos recientes contrasta con la escasez de fuentes sobre muchas de las pandemias del pasado. Sin embargo, tanto una como otras requieren estrategias y técnicas innovadoras de procesamiento de los datos. En el caso de pandemias pasadas, el reto es llenar los vacíos documentales y la falta de fuentes. En el caso de la pandemia actual, en cambio, es preciso encontrar formas de manejar una gran cantidad de información.

La alternativa del arte

El tercer taller («Imaginaciones») experimentó con un formato totalmente distinto e innovador, que desplazó a los participantes al terreno del arte. El taller formaba parte del proyecto Misterio Diáfano (una intervención artística en el espacio público que busca dar con algunas claves relacionadas con futuros escenarios pandémicos) y fue llevado a cabo por artistas del colectivo MITO. En línea con la temática de la escuela, el objetivo principal del taller consistió en imaginar futuros tras la pandemia actual mediante la creación de lemas formados por dos palabras, que, posteriormente, se proyectaron en la Iglesia del Carmen de Mahón. Llegar a estos lemas supuso para los asistentes evocar sentimientos del presente y perspectivas sobre el futuro («expectativas», en la terminología de Koselleck) no estrictamente relacionados con los conocimientos históricos que se poseen, sino más bien con las experiencias personales. Como comentó una participante: «tanto el proceso como el producto final han sido completamente diferentes de lo que solemos producir los historiadores. Nosotros producimos conocimientos, textos que adoptan la forma de artículos o informes, pero en este caso eran un par de palabras proyectadas en una pared». En cierta medida, también se cuestionó el papel del investigador al plantear la cuestión de si el arte es una forma de conocimiento o no.

Como participante en esta edición de la Escuela de Primavera, mi impresión es que, pese a su aparente disparidad, las distintas perspectivas de los tres talleres se complementan, ya que proporcionan una buena visión global de las pandemias, reuniendo enfoques no necesariamente excluyentes para estudiar el pasado. La Escuela no solo me hizo descubrir el Lazareto, sino que me impulsó a pensar en la historia como parte del presente, y a tomar consciencia de la importancia de conocerla para entender cómo podríamos proyectar nuestro futuro.

Lubna Shaheen Abdul Parveen, física de formación y máster en historia de la ciencia por la Universidad Autónoma de Barcelona, es comunicadora científica.



PARA SABER MÁS

Futuro pasado. Reinhard Koselleck. Paidós, 1993.

Los orígenes del lazareto pabellonario. La arquitectura cuarentenaria en el cambio del setecientos al ochocientos. Quim Bonastra en *Asclepio: Revista de Historia de la Medicina y de la Ciencia*, vol. 60, n.º 1, págs. 237-266, 2008.

COVID-19: When history has no lessons. Guillaume Lachenal y Gaëtan Thomas en *History Workshop Online*, marzo de 2020.

History does have something to say. Virginia Beveridge en *History Workshop Online*, mayo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

La pandemia de COVID-19 a la luz de la historia de la medicina. María José Báguena Cervellera en *IyC*, junio de 2020.

La pandemia que olvidamos. Scott Hershberger en *IyC*, enero de 2021.

FORO CIENTÍFICO

EL LADO OSCURO DE LOS NOMBRES CIENTÍFICOS DE LAS ESPECIES

La denominación de los seres vivos, que se rige por un sistema centenario, no está exenta de algunas prácticas abusivas o de ética dudosa

Alejandro Izquierdo López

Homo sapiens, Canis lupus, Tyrannosaurus rex...: cada organismo de nuestro planeta tiene un nombre científico en latín que es único y universal. Los nombres son asignados por la comunidad científica y son fundamentales para catalogar y proteger la vida en la Tierra. Las bases y las normas que rigen su creación han permanecido casi intactas durante más de cien años. Sin embargo, los cambios sociales y tecnológicos de las últimas décadas están generando nuevos retos que nos hacen reflexionar sobre qué nombres damos a las especies y por qué los escogemos. Algunas voces señalan que se trata de un sistema arcaico donde abundan las prácticas colonialistas y de dudosa ética, pero de momento se ha rehusado cambiarlo.

En los Códigos Internacionales de Nomenclatura, un comité de expertos decide las reglas que deben aplicarse a la hora de asignar un nombre científico a una especie. De este modo, el Código Internacional de Nomenclatura Zoológica (ICZN) establece los principios gramaticales y de autoría que deben seguirse. Sin embargo, ciertos aspectos son responsabilidad del investigador. El código, por ejemplo, no determina qué tipos de nombres son apropiados; solo se limita a incluir una pequeña nota que recomienda que no sea ofensivo.

En muchos casos, los investigadores han aprovechado este vacío normativo para dar rienda suelta a su creatividad. Así, entre los nombres científicos encontramos casos humorísticos, como la especie de polilla *La cucaracha* o el loro *Vini vidivinci*, o referencias a la cultura popular, como el escarabajo *Hiperantha pikachu* o la gamba *Synalpheus pinkfloydi*. También abundan los epónimos, nombres que honran a otras personas. Aunque suelen aludir a otros científicos, según el ICZN nada impide utilizar el nombre de un familiar, de una celebridad o incluso de uno mismo —aunque esto último ocurre muy raramente—. Ejemplos de ello son el dinosaurio *Iniestapodus* o los caracoles marinos del género *Gibberula*, 21 de cuyas especies llevan el nombre de ganadoras del premio Príncipe de Asturias. El nombre científico también puede ser utilizado como proclama: según los autores de *Dermophis donaldtrumpi*, la ceguedad de este reptil ilustraba la visión del expresidente estadounidense ante el cambio climático. En 2014, el caracol *Charopa lafargei* recordaba a la empresa cementera Lafarge que el destino de esta especie en riesgo de extinción dependía de sus actividades.

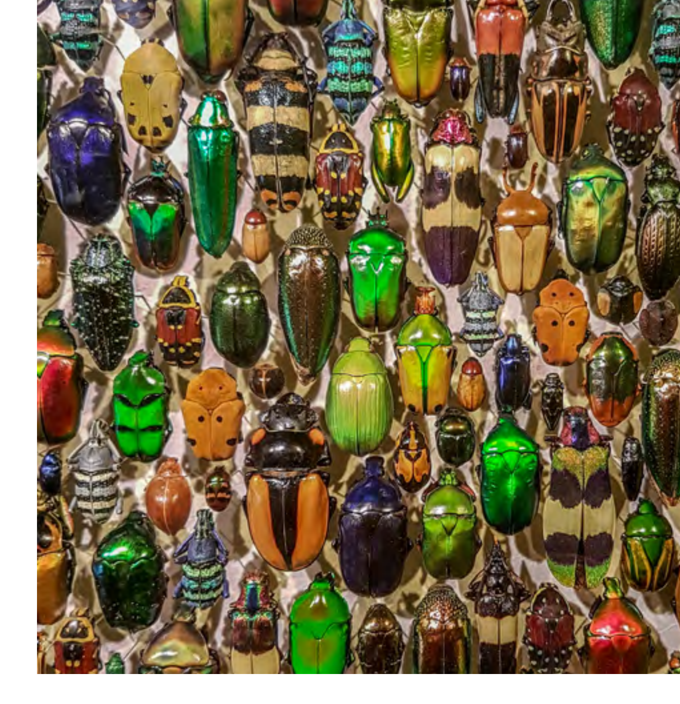
Pero no todas las celebridades o científicos han presentado atributos morales respetables. Muchas especies llevan el nombre de Luis Agassiz, conocido por sus contribuciones en el campo de la geología y paleontología pero también por ser defensor de teorías supremacistas raciales. El escarabajo *Anophthalmus hitleri* o el arbusto *Gardenia leopoldiana* (en referencia al rey Leopoldo II de Bélgica) todavía se identifican

hoy con estas denominaciones, a pesar de las atrocidades causadas por estos individuos. ¿Son dichos nombres solamente un recuerdo de la historia más oscura de la ciencia? ¿Deberían ser reemplazados por otros acordes con la sociedad del siglo xxi? Los defensores de la iniciativa Rhodes must fall creen que sí. Figura prominente de la colonización británica de África y considerado por muchos uno de los arquitectos del *apartheid*, John Cecil Rhodes cuenta con numerosas especies que aluden a su nombre. Pero ahora, un grupo de científicos quiere proponer su modificación en el próximo Congreso Internacional de Botánica, que se celebrará en 2024 en Madrid.

Sin embargo, los nombres científicos no pueden ser modificados fácilmente. Según el ICZN, el primer nombre que se otorga a una especie es inmutable y tiene prioridad sobre cualquier otro posterior con el que se lo quiera sustituir. Es lo que se conoce como principio de prioridad. De este modo, asignar un nombre científico significa tener, en cierta manera, una avenida hacia la inmortalidad histórica.

Esta inmortalidad ha atraído el fenómeno de la venta de nombres. Cada vez más instituciones, como Rainforest Trust, Biopat o Scripps, ponen en subasta la oportunidad de nombrar una especie nueva. Las mayores ventas hasta la fecha, cercanas a 600.000 dólares, han sido otorgadas al casino en línea Goldenpalace.com por el mono *Callicebus aureipalatii*, y al fotógrafo Jeffey Gale por el tiburón *Hemiscyllium galei*. Algunos ven en esta práctica una comercialización de la ciencia, donde las especies obtienen nombres de personas que ni siquiera participaron en el proceso científico. También consideran que es un sistema del que se podría abusar por interés económico. Por ejemplo, los tigres, distribuidos desde la India hasta Rusia, constituyen una sola especie (*Panthera tigris*); algunos científicos con pocos escrúpulos podrían definir el tigre indio como una especie diferente y nombrarlo al mejor postor. Pero los defensores de estas prácticas señalan que las ganancias de estas subastas se destinan solo a programas de conservación y a ayudar a un campo de investigación que tradicionalmente ha sufrido de falta de fondos y de atención mediática.

La inmortalidad también ha atraído a científicos, muchas veces ajenos al sistema académico tradicional, quienes nombran nuevas especies en revistas autopublicadas y con poca base científica. Al aprovecharse del principio de prioridad del código, se aseguran de que ellos y sus nombres permanezcan en la historia de la ciencia. Recientemente, expertos en caracoles y reptiles han detectado centenares de estos casos de «vandalismo taxonómico» y han pedido una intervención extraordinaria del código para modificar o eliminar estos nombres. Esta propuesta también resulta atractiva para otros grupos: científicos neozelandeses argumentan que es necesario reemplazar los nombres que reflejen una historia de colonialismo por otros que honren la cultura y lenguas de las poblaciones indígenas. Pero otros investigadores creen que ello solo generaría más problemas: la regla de prioridad se creó para evitar que una especie tuviera más de un nombre, y estas iniciativas causarían justo lo contrario.



CAVAN IMAGES/ISTOCK

Es posible que sea hora de reformar el código, de reevaluar qué nombres hemos dado y daremos a los organismos que habitan nuestro planeta. Pero hay otras cuestiones que también son urgentes. El número de las especies en vías de extinción, la mayoría probablemente desconocidas, aumenta cada día. Teniendo esto en cuenta y que las manos y el presupuesto científico son muy limitados, ¿supone una prioridad cambiar los nombres de lo que sí conocemos?

Alejandro Izquierdo López, especialista en taxonomía, evolución y paleontología de los artrópodos, investiga en el Departamento de Ecología y Biología Evolutiva de la Universidad de Toronto.



CÚMULO MASIVO DE GALAXIAS MACSJ0717.5+3745: Los estudios de cúmulos galácticos y otras grandes estructuras cósmicas revelan preocupantes incongruencias en nuestras ideas acerca del universo.

ASTRONOMÍA

TENSIONES COSMOLÓGICAS

Anil Ananthaswamy | El debate en torno al valor de algunos parámetros cruciales del modelo cosmológico estándar definirá la astrofísica de la próxima década

NASA/ESA/EQUIPO DEL PROYECTO FRONTIER FIELDS DEL HUBBLE (STSCI)

¿A qué velocidad se expande el universo? ¿Cómo se distribuye la materia en nuestra vecindad cósmica? Disponemos de dos métodos para responder a estas preguntas. Uno consiste en observar el universo primitivo y extrapolar al momento presente, y el otro, en realizar mediciones directas en nuestro entorno cósmico. Sin embargo, hay una pega: esos dos métodos arrojan respuestas distintas una y otra vez. La manera más sencilla de explicar tales discrepancias es suponer que se deben a errores observacionales, pero los científicos también contemplan otra posibilidad más atractiva: que esas «tensiones» (entre las predicciones y las observaciones, y entre el universo temprano y el tardío) reflejen un problema profundo en el modelo cosmológico estándar, la teoría que condensa nuestros conocimientos y suposiciones sobre el universo. Encontrar y arreglar esa falla podría transformar nuestra compresión del cosmos.

EN SÍNTESIS

El modelo cosmológico estándar describe con éxito la mayor parte de observaciones acerca del universo. Se basa en la existencia de dos sustancias de naturaleza desconocida: la materia y la energía oscuras.

Sin embargo, al estimar a través de distintos métodos dos parámetros cosmológicos relacionados con la velocidad a la que se expande el cosmos y la distribución de la materia, se obtienen resultados incompatibles.

Esas discrepancias podrían deberse a un error observacional o señalar un problema en el modelo cosmológico estándar. La próxima generación de telescopios, más potentes y precisos, podría darnos la respuesta.

Sea como fuere, parece seguro que obtendremos la respuesta en el próximo decenio, a medida que los nuevos telescopios terrestres y espaciales ofrezcan a los astrónomos una visión más clara del cosmos. «Investigar esas tensiones es una forma estupenda de aprender sobre el universo», afirma el astrofísico y premio nóbel Adam Riess, de la Universidad Johns Hopkins. «Nos permite orientar nuestros experimentos a objetivos muy concretos, en vez de dar palos de ciego.»

Riess considera que esos nuevos observatorios están a punto de inaugurar la tercera generación de la cosmología de precisión. La primera llegó en la década de 1990 y los albores del siglo XXI, con el telescopio espacial Hubble y el satélite WMAP de la NASA. Este último aportó medidas más precisas de la luz más antigua del universo, el fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés). También conformaron esa primera generación los telescopios de ocho metros de Chile, así como los telescopios gemelos Keck, situados en Hawái y de diez metros de diámetro.

Esos instrumentos ayudaron a formular el modelo cosmológico estándar, según el cual el universo es un cóctel compuesto por un 5 por ciento de materia ordinaria, un 27 por ciento de materia oscura y un 68 por ciento de energía oscura. Dicho modelo da cuenta, con admirable precisión, de la mayor parte de nuestras observaciones sobre las galaxias, los cúmulos galácticos y otras estructuras a gran escala, incluida su evolución a lo largo del tiempo cósmico. Irónicamente, el propio éxito del modelo pone de relieve aquello que ignoramos: la naturaleza exacta del 95 por ciento del universo.

Impulsada por las medidas aún más precisas del CMB realizadas por el satélite Planck, de la Agencia Espacial Europea, y varios telescopios terrestres, la segunda generación de la cosmología de precisión vino a confirmar el modelo estándar, pero también sacó a la luz las tensiones. La atención pasó a centrarse en reducir los errores sistemáticos, desviaciones reproducibles vinculadas a fallos en el diseño de los experimentos o de los equipos.

Ahora, la tercera generación está empezando a entrar en escena, con el exitoso lanzamiento del telescopio espacial James Webb, llamado a ser el sucesor del Hubble. Desde la superficie, redes de radiotelescopios como el Observatorio Simons en el desierto chileno de Atacama y CMB-S4 (un futuro conjunto de 21 antenas y medio millón de detectores enfriados a temperaturas criogénicas, repartido entre Atacama y el Polo Sur) medirán el CMB con más precisión que Planck.

Esa tercera generación girará en torno a los telescopios que exploran amplias regiones del firmamento. Lo más probable es que el primero de ellos sea el telescopio espacial de 1,2 metros Euclides, de la Agencia Espacial Europea, que debería despegar en 2023. Euclides estudiará la forma y distribución de miles de millones de galaxias, y cubrirá alrededor de una tercera parte del cielo. Sus observaciones complementarán las del telescopio espacial Nancy Grace Roman de la NASA, un instrumento de 2,4 metros con un campo de visión unas 100 veces mayor que el


DANVIS COLLECTION/ALAMY STOCK PHOTO

VISTA NOCTURNA del Telescopio del Polo Sur, uno de los varios observatorios de radio que estudian el fondo cósmico de microondas.

del Hubble y cuyo lanzamiento está previsto para 2025. Por último, el Observatorio Vera C. Rubin, que comenzará a operar en Chile a mediados de esta década, cartografiará todo el cielo en unas pocas noches gracias a su espejo de 8,4 metros y su cámara de 3200 megapíxeles, la mayor jamás construida con fines astronómicos. «No estaremos limitados por el ruido ni por los errores sistemáticos, porque son observatorios independientes», señala Priyamvada Natarajan, astrofísica de la Universidad Yale. «Incluso si hubiera errores sistemáticos en nuestro enfoque, deberíamos [ser capaces de] detectarlos.»

La escalera de distancias

A Riess le gustaría ver resuelta la «tensión de Hubble», que emana de las distintas estimaciones del valor de la constante de Hubble (H_0), una medida del ritmo actual al que se expande el universo. Riess lidera el proyecto SH0ES (siglas de Supernovas y H_0 para la Ecuación de Estado de la Energía Oscura), cuya meta es medir H_0 partiendo del primer peldaño de la «escalera de distancias cósmicas», una serie de métodos para medir separaciones celestes cada vez más grandes.

Ese peldaño inicial, que se refiere a los objetos cósmicos más próximos, se basa en la determinación de la distancia a las variables cefeidas, unas estrellas especiales que pulsan (cambian de tamaño y brillo) con un período proporcional a su luminosidad intrínseca: esta es mayor cuanto más largas son las pulsaciones. Dicha relación entre variabilidad y luminosidad, que se calibra midiendo la distancia a las cefeidas más próximas mediante paralaje, convierte a esas estrellas en «candelas estándar», objetos de referencia que permiten establecer distancias dentro de la Vía Láctea y a las galaxias cercanas. (El período de pulsación de una cefeida revela su luminosidad intrínseca, y a partir de esta y del brillo aparente con que la vemos en el cielo, podemos calcular cómo de lejos se encuentra.)

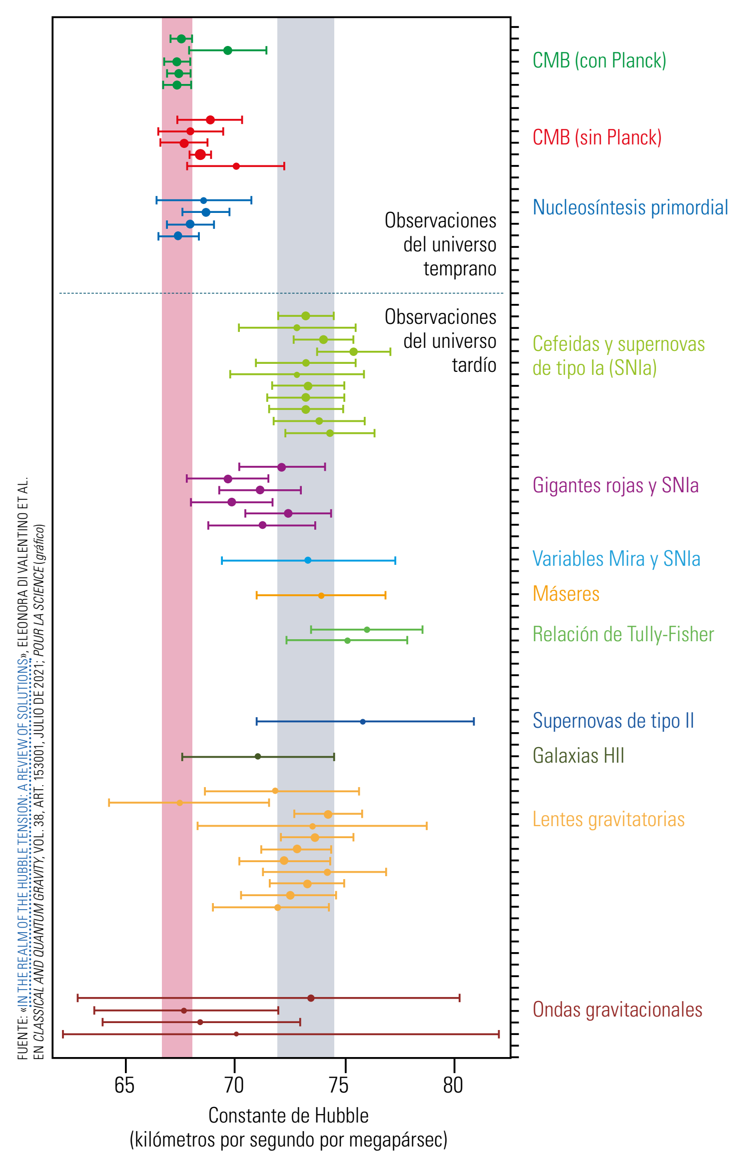
Esas estrellas variables también proporcionan la base para el segundo peldaño de la escalera, puesto que las distancias obtenidas a partir de las cefeidas sirven para calibrar otras candelas estándar más potentes, las explosiones estelares conocidas como supernovas de tipo Ia.

A continuación, los astrónomos localizan supernovas de tipo Ia en galaxias más lejanas, y las emplean para establecer la relación entre la distancia a la galaxia y su desplazamiento al rojo, una medida de la rapidez con la que se aleja de nosotros. El resultado es una estimación de H_0.

Riess explica que el pasado diciembre, «tras un par de años investigando el tema en profundidad», los equipos de SH0ES y Pantheon+ (un proyecto que ha compilado un amplio conjunto de datos sobre supernovas de tipo Ia) anunciaron los resultados de casi 70 análisis distintos de sus datos combinados. Entre esos datos había observaciones de variables cefeidas en 37 galaxias que contenían 42 supernovas de tipo Ia, más del doble de las supernovas que examinó SH0ES en 2016. Riess y sus coautores sospechan que ese estudio ha llevado al límite las capacidades del telescopio Hubble y supone su última contribución a la escalera cósmica de distancias. Los datos ya incluyen «todas las supernovas de tipo Ia idóneas observadas entre 1980 y 2021» en el universo cercano. Según ese análisis, H_0 vale 73,04 ± 1,04 kilómetros por segundo por megapársec.

Esa cifra se aleja mucho de la hallada por medio de un método totalmente distinto, que se fija en el extremo opuesto de la historia cósmica: la época de la recombinación, cuando el universo se volvió transparente a la luz, lo que sucedió unos 380.000 años después de la gran explosión. La radiación emitida entonces, estirada por la expansión del cosmos hasta longitudes de onda propias de las microondas, forma hoy el ubicuo CMB. Las minúsculas fluctuaciones en la temperatura y la polarización de esa radiación de fondo encierran una información relevante: la distancia que recorrieron las ondas acústicas desde los primeros instantes del universo hasta la recombinación [*véase* «La sinfonía cósmica», por Wayne Hu y Martin White; Investigación y Ciencia, abril de 2004].

Dicha longitud es un parámetro útil para la cosmología de precisión y sirve para calcular el valor de H_0, extrapolando al universo actual mediante el modelo cosmológico estándar, también conocido como modelo ΛCDM. (Λ representa la constante cosmológica o energía oscura, y CDM son las siglas inglesas de «materia oscura fría», en referencia a la suposición de que las partículas de materia oscura son relativamente lentas.) El análisis más reciente, publicado hace un año y



FUENTE: «IN THE REALM OF THE HUBBLE TENSION: A REVIEW OF SOLUTIONS», ELEONORA DI VALENTINO ET AL. EN *CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY*, VOL. 38, ART. 153001, JULIO DE 2021; *POUR LA SCIENCE* (*gráfico*)

LA CONSTANTE DE HUBBLE, una medida del ritmo actual al que se expande el cosmos, se puede determinar a partir de observaciones del universo primitivo (basadas sobre todo en el fondo cósmico de microondas) o del universo local, usando diversas «candelas estandar» para estimar las distancias a objetos cada vez más lejanos y relacionando estas con las velocidades de recesión. El primer método arroja valores sistemáticamente más bajos (*banda vertical rosa*, resultado de la colaboración SH0ES) que los del segundo (*banda gris*, valor de Planck), una discrepancia conocida como «tensión de Hubble».

que combina los datos del satélite Planck con los de dos observatorios terrestres, el Telescopio Cosmológico de Atacama y el Telescopio del Polo Sur, arroja un valor de 67,49 ± 0,53 kilómetros por segundo por megapársec para H_0.

La discrepancia entre ambas estimaciones tiene una significación estadística de cinco desviaciones estándar, lo que significa que solo hay una posibilidad entre un millón de que se deba a una fluctuación estadística. «Sin duda, hemos llegado a un punto en el que la gente tiene que tomarse esto en serio», señala Riess. «Y lo ha hecho.»

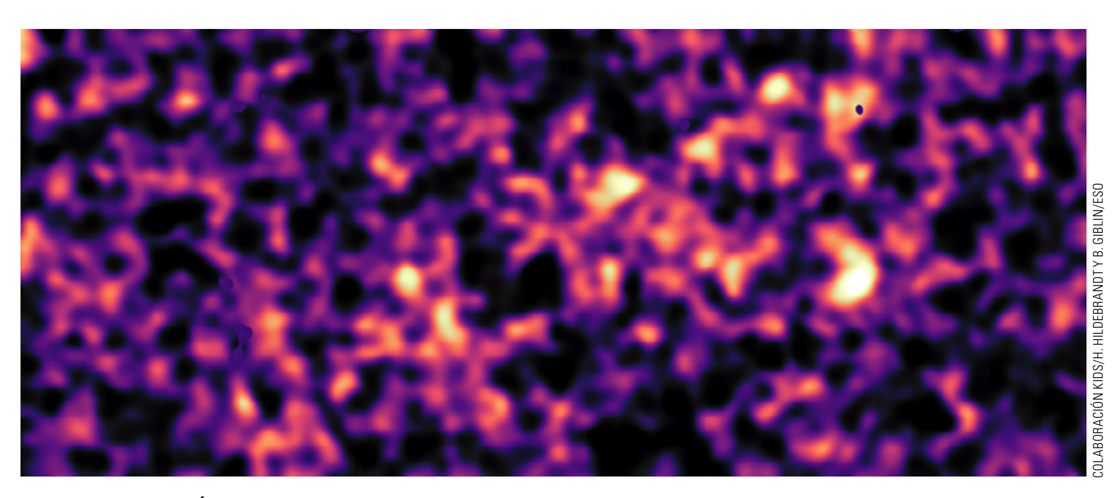
El agrupamiento de la materia

La otra tensión que los científicos están comenzando a tomarse en serio se refiere a un parámetro cosmológico llamado S_8, que depende de la densidad de materia en el cosmos y del grado en que esta se acumula, en lugar de distribuirse de manera uniforme. Los cálculos de S_8 también involucran, por un lado, medidas del CMB y, por otro, observaciones de nuestro universo local. El resultado obtenido a partir del universo primitivo y extrapolado mediante el modelo ΛCDM da un valor actual de 0,834 para este parámetro.

Las determinaciónes de S_8 en el universo local emplean una gran variedad de métodos. Entre los más precisos están las observaciones de lentes gravitatorias débiles, que miden la distorsión media producida en la forma de millones de galaxias debido a la influencia gravitatoria de las concentraciones de materia (tanto normal como oscura) situadas entre esas galaxias y nosotros. Los astrónomos han usado los últimos datos del Sondeo del Kilogrado (KiDS), que ha aumentado su cobertura del cielo de 350 a 777 grados cuadrados (como referencia, la superficie de la luna llena abarca tan solo 0,2 grados cuadrados), y han obtenido un valor de 0,759 para S_8. La discrepancia entre las medidas de este parámetro en los universos temprano y tardío ha pasado de 2,5 desviaciones estándar en 2019 a 3 en la actualidad (es decir, que hay una posibilidad entre 740 de que responda a una mera fluctuación estadística). «Esta tensión no va a desparecer», sentencia Hendrik Hildebrandt, astrónomo en la Universidad del Ruhr de Bochum. «Se ha agudizado.»

Existe aún otra forma de obtener el valor de S_8: contar los cúmulos de galaxias más masivos presentes en un determinado volumen del espacio. Esto puede hacerse de forma directa, por ejemplo, usando lentes gravitatorias. Pero también es posible contabilizarlos estudiando su huella en el fondo cósmico de microondas, gracias al efecto Sunyáev-Zeldóvich: los fotones del CMB se dispersan en los electrones calientes de los cúmulos de galaxias, lo cual crea «sombras» proporcionales a la masa del cúmulo en el CMB.

Un estudio de 2019 basado en datos del Telescopio del Polo Sur estimó el valor de S_8 en 0,749, de nuevo muy lejos de los obtenidos partir del CMB y el modelo ΛCDM. Estos resultados podrían ser compatibles si los cálculos de las masas de los cúmulos fuesen incorrectos en aproximadamente un 40 o un 50 por ciento, según Natarajan, quien, no obstante, considera improbable que exista un error tan sustancial. «No se nos dan tan mal



COLABORACIÓN KIDS/H. HILDEBRANDT Y B. GIBLIN/ESO

LA COLABORACIÓN KIDS (Sondeo del Kilogrado) ha usado el efecto de lentes gravitatorias débiles para determinar cómo se reparte la materia oscura en una amplia extensión del cielo. La distribución es muy heterogénea, con regiones muy densas (*amarillo*) y otras mucho más vacías (*negro*). Estos datos sirven para evaluar S_8, un parámetro cosmológico que caracteriza la distribución de materia en el universo.

las mediciones», afirma. «Así que estamos ante otra incongruencia interna, otra anomalía que apunta a algo más.»

Resolver las tensiones

A la vista de estas discrepancias, no es extraño que los cosmólogos esperen con impaciencia los datos de la nueva generación de observatorios. David Spergel, de la Universidad de Princeton, está deseando que los astrónomos comiencen a usar el telescopio James Webb para estudiar las estrellas más brillantes de la «rama de las gigantes rojas». Esos astros tienen una luminosidad bien conocida y pueden emplearse como candelas estándar para medir distancias galácticas, por lo que constituyen un peldaño independiente de la escalera de distancias. En 2019, Wendy Freedman, de la Universidad de Chicago, y sus colaboradores emplearon esa técnica para estimar H_0, y hallaron un valor que se sitúa justo entre los que proporcionan las mediciones del universo primitivo y las del tardío. «Dadas las barras de error, los datos actuales del extremo de la rama de las gigantes rojas resultan compatibles con ambas opciones», señala Spergel. Los astrónomos también piensan usar el telescopio Webb para recalibrar las cefeidas que observó el Hubble. Además, el nuevo instrumento ayudará a crear otro peldaño en la escalera de distancias gracias a las variables Mira, estrellas que, como las cefeidas, presentan una relación período-luminosidad útil para la cartografía cósmica.

Así pues, es posible que el observatorio James Webb alivie o empeore la tensión de H_0, mientras que los sondeos de campo amplio de los telescopios Euclides, Roman y Rubin podrían hacer lo propio con la de S_8, al estudiar el modo en que se acumula la materia. La ingente cantidad de datos que se espera obtener con estos tres instrumentos reducirá muchísimo las barras de error de S_8. Según Natarajan, «las estadísticas serán increíbles».

Entretanto, los cosmólogos teóricos están disfrutando con ambas tensiones. «Esto es jauja para ellos», bromea Riess. «Les das algunas tensiones que se hayan observado realmente y se divierten más que nosotros.»

Una idea reciente que ha recibido mucha atención es la llamada energía oscura temprana. En la versión canónica del modelo ΛCDM, la energía oscura empieza a dominar el universo en una etapa más o menos tardía de la historia cósmica, hace unos cinco mil millones de años. Pero, como explica Spergel, «no sabemos por qué la energía oscura es la componente imperante en el universo actual. Como no sabemos por qué es importante hoy, también podría haberlo sido antes». Este es, en parte, el motivo para considerar posibles efectos de la energía oscura en épocas más tempranas, anteriores a la recombinación. Aun si la energía oscura no representara más del 10 por ciento del contenido energético del universo en aquellos momentos, eso bastaría para acelerar las primeras fases de la expansión cósmica, lo cual haría que la recombinación ocurriera antes y acortaría la distancia recorrida por las ondas acústicas primordiales. El efecto neto sería el de mitigar la tensión en torno a H_0.

«El problema estriba en usar un modelo basado en una comprensión del universo que es incompleta en un 95 por ciento»

Adam Riess
Universidad Johns Hopkins

«Lo que encuentro más interesante de estos modelos es que son falsables», comparte Spergel. Dichos modelos hacen predicciones acerca de la forma en que la energía oscura temprana modularía el patrón de los fotones del CMB. En febrero de 2022, Silvia Galli, integrante de la colaboración Planck en la Universidad de la Sorbona, publicó junto a otros científicos un análisis de las observaciones de Planck y de los telescopios terrestres que estudian el CMB, que parece favorecer la idea de la energía oscura temprana frente al modelo ΛCDM por un estrecho margen estadístico. Confirmar o refutar estos resultados provisionales requerirá más y mejores datos, que podrían llegar pronto gracias a las observaciones de esos mismos telescopios terrestres. Pero incluso si los modelos de energía oscura temprana ofrecieran un mejor ajuste a los datos y resolvieran la tensión de Hubble, apenas tendrían impacto en la de S_8.

TELESCOPIOS DE PRECISIÓN

A partir de la década de 1990, la cosmología entró en una «era de precisión», gracias a la puesta en marcha de instrumentos que estudian las propiedades del universo con gran exactitud. La tercera generación de estos observatorios está a punto de ver la luz, y la cuarta se halla ya en fase de construcción.

PRIMERA GENERACIÓN



HUBBLE

Con un espejo de 2,4 metros de diámetro, es el primer gran observatorio espacial entre el infrarrojo cercano y el ultravioleta.

WMAP

Sensible a las frecuencias de 23, 33, 41, 61 y 94 gigahercios, WMAP cartografió el fondo cósmico de microondas. Sus datos permitieron calcular los parámetros cosmológicos con una precisión 68.000 veces superior a la de su predecesor, COBE.

VLT

Dotado de cuatro telescopios principales (con espejos de 8,2 metros de diámetro) y cuatro auxiliares, el Telescopio Muy Grande escudriña el cielo en el visible y el infrarrojo. Opera en distintos modos, entre ellos uno interferométrico que combina las observaciones de los cuatro instrumentos.

KECK

Este observatorio posee dos telescopios con espejos primarios de 10 metros de diámetro y segmentados en 36 elementos. Ambos pueden funcionar juntos como un interferómetro.

SEGUNDA GENERACIÓN



PLANCK

Con un instrumento principal refrigerado a 0,1 kelvin, Planck trazó un mapa del fondo cósmico de microondas entre 20 y 30 veces más preciso que el de su predecesor, WMAP.

ALMA

Esta red sensible a ondas milimétricas está formada por 66 antenas (con diámetros de 7 a 12 metros) que pueden separarse a distancias de entre 150 metros y 16 kilómetros, para potenciar la resolución o el tamaño del campo de visión.

TMT (04.)
Mauna Kea, Hawái
Previsto para 2027

KECK (01.)
Mauna Kea, Hawái
Operativo desde 1993

ALMA (02.)
Llano de Chajnantor, Chile
Operativo desde 2011

VLT (01.)
Cerro Paranal, Chile
Operativo desde 1998

NANCY GRACE ROMAN (03.)
Espacial, punto de Lagrange L2
Previsto para 2027

HUBBLE (01.)
Espacial, órbita terrestre
Operativo desde 1990

SIMONS (03.)
Llano de Chajnantor, Chile
Previsto para 2023

HAWÁI

CHILE

POLO SUR

ELT (04.)
Cerro Armazones, Chile
Previsto para 2027

WMAP (01.)
Espacial, punto de Lagrange L2
2001-2010

JAMES WEBB (03.)
Espacial, punto de Lagrange L2
Operativo desde 2022

CMB-S4 (03.)
Polo Sur y Chile
Previsto para 2027

PLANCK (02.)
Espacial, punto de Lagrange L2
2009-2013

VERA RUBIN (03.)
Cerro Pachón, Chile
Previsto para 2022-2023

GMT (04.)
Las Campanas, Chile
Previsto para 2029

EUCLIDES (03.)
Espacial, punto de Lagrange L2
Previsto para 2023

OBSERVATORIO INTERNACIONAL DEL TELESCOPIO DE TREINTA METROS (*TMT*); ETHAN TWEEDIE PHOTOGRAPHY/OBSERVATORIO W. M. KECK (*Keck*); ESO/C. MALIN (*ALMA*); RIVI/WIKIMEDIA COMMONS, CC BY-SA 3.0 (*VLT*); NASA (*Nancy Grace Roman y Hubble*); NASA/EQUIPO CIENTÍFICO DE WMAP (*WMAP*); NASA/ESA (*Euclides*); NORTHRUP GRUMMAN (*James Webb*); COLABORACIÓN CMB-S4 (*CMB-S4*); CORPORACIÓN GMTO (*GMT*); OBSERVATORIO VERA RUBIN/NSF/AURA (*Rubin*); ESA/AOES MEDIALAB (*Planck*); SWINBURNE ASTRONOMY PRODUCTIONS/ESO (*ELT*); OBSERVATORIO SIMONS (*Simons*); *POUR LA SCIENCE* (*gráfico*)

TERCERA GENERACIÓN



JAMES WEBB

El sucesor del Hubble posee una banda espectral limitada al infrarrojo (cercano y medio) y una parte del visible, pero con mayor resolución. Su espejo primario segmentado mide 6,5 metros de diámetro.

SIMONS

Este observatorio constará de un telescopio principal de 6 metros y tres pequeños telescopios auxiliares. Su sensibilidad a la polarización del fondo cósmico de microondas mejorará la de Planck en un orden de magnitud.

CMB-S4

Este observatorio estará compuesto por 21 telescopios y medio millón de detectores criogénicos. Recogerá datos sobre el fondo cósmico de microondas durante siete años.

EUCLIDES

Sensible al visible y al infrarrojo, este telescopio estimará la distancia a otras galaxias, lo que dará pistas sobre el origen de la expansión del universo y la naturaleza de la energía oscura.

NANCY GRACE ROMAN

Su misión es similar a la de Euclides. Su espejo primario medirá 2,4 metros de diámetro.

VERA RUBIN

Este telescopio óptico se caracteriza por un campo de visión muy amplio. Podrá explorar todo el cielo en menos de tres días gracias a su detector de 3200 megapíxeles.

CUARTA GENERACIÓN



ELT

El Telescopio Extremadamente Grande tendrá un espejo primario segmentado de 39,3 metros de diámetro y uno secundario de 4,2 metros. Su sistema de óptica adaptativa corregirá las perturbaciones atmosféricas.

TMT

El nombre del Telescopio de Treinta Metros hace referencia al diámetro de su espejo segmentado. Será capaz de observar desde el ultravioleta cercano al infrarrojo medio y estará equipado con un sistema de óptica adaptativa.

GMT

El Telescopio Gigante Magallanes constará de siete espejos primarios de 8,4 metros de diámetro cada uno, y alcanzará la resolución espacial de un telescopio con un espejo primario de 24,5 metros.

Las soluciones propuestas para el problema de S_8 también se muestran frustrantemente ineficaces a la hora de abordar el de H_0. El pasado marzo, Guillermo Franco Abellán, de la Universidad de Montpellier, y sus colaboradores publicaron un estudio en *Physical Review D* donde sugerían una posible manera de aliviar la tensión de S_8: la hipotética desintegración de las partículas de materia oscura en una partícula masiva y otra «templada» de masa cero. Este mecanismo podría reducir el valor de S_8 obtenido a partir de las extrapolaciones basadas en el CMB, acercándolo más a las medidas del universo tardío. Por desgracia, eso no resuelve la discrepancia en torno a H_0. «Parece una constante: cualquier modelo que uno pueda formular para solventar la tensión de H_0 empeora la de S_8, y viceversa», lamenta Hildebrandt. «Hay unos pocos modelos que, al menos, no agravan el otro problema, aunque tampoco lo mejoren mucho.»

Algo se nos escapa

Con la llegada de los nuevos datos, Spergel prevé varios escenarios posibles. Puede que las medidas del CMB resulten compatibles con la energía oscura temprana, lo cual solucionaría la tensión de H_0, y que (de manera independiente) los futuros estudios con telescopios logren mejorar el problema con S_8. Eso representaría un triunfo para los modelos de energía oscura temprana y comportaría un cambio importante en nuestra comprensión de los capítulos iniciales de la historia cósmica. También es posible que ambas tensiones se acaben resolviendo en favor del modelo ΛCDM. Eso supondría una reivindicación del modelo cosmológico estándar y una victoria agridulce para los teóricos que anhelan un cambio de paradigma. Por supuesto, podría ser que no se solventara ninguna de las dos discrepancias. «La tercera opción es que ambas tensiones se vayan haciendo más y más significativas a medida que mejoran los datos, y que la energía oscura temprana no constituya la solución», señala Spergel. En tal caso, seguramente habría que reformular el modelo ΛCDM, aunque no está claro cómo.

Natarajan cree que las tensiones y discrepancias apuntan a que el modelo cosmológico estándar es tan solo una «teoría efectiva», un término técnico para indicar que explica con precisión un subconjunto de las observaciones cosmológicas actuales. «Quizás lo que ocurre es que existe una teoría subyacente más compleja», aventura, «y que el modelo ΛCDM es esa teoría [efectiva] que parece incluir la mayoría de los ingredientes clave. Para las observaciones realizadas hasta ahora, esa teoría efectiva sería suficiente». Pero los tiempos cambian, y el aluvión de datos que llegará con los potentes observatorios de la tercera generación de la cosmología de precisión podría exigir modelos más creativos y elaborados.

Los teóricos, por supuesto, están encantados de buscarlas. Por ejemplo, Spergel especula que, si la energía oscura temprana interactuase con la materia oscura (el modelo ΛCDM no contempla ninguna interacción entre la materia y la energía oscuras), eso podría suprimir las fluctuaciones de materia en el universo temprano, de una forma que resolviese la tensión de S_8 y, al mismo tiempo, diese cuenta de la de H_0. «Esos modelos son más rebuscados», admite Spergel, «pero tal vez es lo que pide la naturaleza».

Como astrónomo observacional, Hildebrandt se muestra prudente. «Si hubiera una teoría convincente que solucionase de manera elegante ambas tensiones, ya tendríamos el próximo modelo estándar», subraya. «El hecho de que aún estemos hablando de estas tensiones y cavilando sobre ellas lo único que refleja es que todavía no disponemos de tal teoría.» Riess coincide. «Después de todo, el problema estriba en usar un modelo basado en una comprensión de la física y del universo que es incompleta en aproximadamente un 95 por ciento», concluye. «No es una locura pensar que se nos está escapando algo.»

Anil Ananthaswamy es periodista científico especializado en física y ciencias del espacio. Es autor de los libros *The edge of physics*, *The man who wasn't there* y *Through two doors at once: The elegant experiment that captures the enigma of our quantum reality.*



PARA SABER MÁS

In the realm of the Hubble tension: A review of solutions. Eleonora Di Valentino et al. en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 38, art. 153001, julio de 2021.

Measurements of the Hubble constant: Tensions in perspective. Wendy L. Freedman en *The Astrophysical Journal*, vol. 919, art. 16, septiembre de 2021.

Challenges for ΛCDM: An update. Leandros Perivolaropoulos y Foteini Skara en *New Astronomy Reviews*, vol. 95, art. 101659, junio de 2022.

The H_0 Olympics: A fair ranking of proposed models. Nils Schöneberg et al. en *Physics Reports*, vol. 984, págs. 1-55, octubre de 2022.

EN NUESTRO ARCHIVO

El problema de la constante de Hubble. Dominik J. Schwarz en *IyC*, marzo de 2019.

La crisis en torno a la constante de Hubble. Richard Panek en *IyC*, mayo de 2020.

¿Hay que revisar el modelo cosmológico? Jean-Philippe Uzan en *IyC*, noviembre de 2021.

EPIGENÉTICA

TRAUMAS INTERGENERACIONALES

Rachel Yehuda | Las experiencias adversas de los padres dejan huellas epigenéticas en sus hijos



JOYCE HESSELBERTH

Después de que las Torres Gemelas se desplomaran, en medio de una nube de humo y horror, el 11 de septiembre de 2001, el personal sanitario de la Escuela de Medicina Icahn del Monte Sinaí se ofreció a examinar a cualquiera que hubiese estado en la zona, para determinar su exposición a toxinas. Entre las personas que acudieron a la revisión había 187 mujeres embarazadas. Muchas estaban conmocionadas, y un colega me pidió que colaborara en su diagnóstico y seguimiento. Corrían el riesgo de desarrollar un trastorno por estrés postraumático (TEPT) y experimentar reviviscencias (*flashbacks*), pesadillas, insensibilidad emocional u otros síntomas psiquiátricos durante años. ¿Y los fetos? ¿Corrían algún peligro?

Mi equipo de investigación sobre el trauma formó con premura a los profesionales de la salud para evaluar y, en caso necesario, tratar a esas mujeres, a las que hicimos un seguimiento durante el resto del embarazo y tras el parto. Al nacer, los bebés eran más pequeños de lo normal, el primer síntoma de que el trauma causado por los ataques al World Trade Center había llegado al útero. Nueve meses después, examinamos a 38 de las mujeres y a sus bebés cuando vinieron a una visita de control, y las evaluaciones psicológicas mostraron que muchas de las madres habían desarrollado TEPT. Y las que lo sufrían presentaban niveles excepcionalmente bajos de cortisol (una hormona relacionada con el estrés), un signo que los investigadores estaban empezando a asociar con el trastorno.

Para nuestra sorpresa y alarma, la saliva de los bebés de nueve meses de las mujeres con TEPT también mostraba concentraciones bajas de cortisol; el efecto era más pronunciado en los bebés cuya madre se encontraba en el tercer trimestre del embarazo en aquel aciago día. Justo un año antes del atentado, un equipo bajo mi dirección había notificado niveles bajos de cortisol en los hijos adultos de supervivientes del Holocausto, pero lo achacamos a que habían sido criados por padres que sufrían las consecuencias emocionales persistentes de un trauma grave. Ahora parecía como si el trauma dejara una huella en los descendientes incluso antes de nacer.

En las décadas transcurridas desde entonces, las investigaciones de mi grupo y otros han confirmado que las experiencias adversas pueden afectar a la siguiente generación a través de distintas vías. La más evidente tiene que ver con el comportamiento parental, pero las influencias durante la gestación e incluso los cambios en los óvulos y espermatozoides también podrían desempeñar un papel. Y todos esos canales parecen relacionados con procesos epigenéticos: aquellos que modifican la expresión de los genes sin que varíe la secuencia del ADN. La epigenética podría explicar por qué los efectos de un trauma a veces persisten mucho tiempo después de que haya desaparecido la amenaza inmediata, y también interviene en las distintas vías que transmiten el trauma a las generaciones futuras.

Las implicaciones de tales hallazgos pueden parecer funestas, pues sugieren que el trauma de una persona hace a sus descendientes más vulnerables a los trastornos mentales. Pero también existen algunos indicios de que la respuesta epigenética podría actuar como una adaptación que ayudaría a los hijos de padres traumatizados a lidiar con dificultades similares. ¿O quizá son ciertas ambas cosas?

EN SÍNTESIS

Las experiencias traumáticas vividas por una persona pueden afectar a la siguiente generación a través de diversas vías relacionadas con alteraciones en el funcionamiento de los genes.

Esa respuesta epigenética explica la persistencia de los efectos del trauma y podría hacer que los hijos de padres traumatizados fueran más propensos a sufrir trastornos mentales.

Sin embargo, es posible que los efectos epigenéticos también preparen a los descendientes para lidiar con dificultades similares a las que afrontaron sus progenitores.

Secuelas

Mi primer contacto con la transmisión intergeneracional del trauma tuvo lugar en los noventa, poco después de que mi equipo documentara la existencia de una tasa elevada de TEPT entre los supervivientes del Holocausto que vivían en la comunidad donde yo misma crecí, en Cleveland. Al tratarse del primer estudio de ese tipo, obtuvo mucha publicidad, y en pocas semanas me encontraba dirigiendo un nuevo centro de investigación sobre el Holocausto en Monte Sinaí, integrado en su mayor parte por voluntarios profesionales. El teléfono no paraba de sonar, pero no todos los que llamaban eran supervivientes del Holocausto: la mayoría eran los hijos ya adultos de dichos su-

pervivientes. Uno de ellos, que fue especialmente persistente (llamémosle Joseph), insistía en que estudiara a gente como él. «Soy una víctima del Holocausto», afirmaba.

La adversidad durante la infancia está conectada con los niveles bajos de cortisol y con la posibilidad de desarrollar trastorno por estrés postraumático en el futuro

Cuando vino a hacer una entrevista, Joseph no parecía una víctima de nada. Era un atractivo y acaudalado agente de un banco de inversión, e iba vestido de Armani: parecía sacado de una revista. Pero Joseph vivía cada día con la vaga sensación de que iba a suceder algo terrible y de que quizá tendría que huir o luchar por su vida. Se había estado preparando para lo peor desde que tenía poco más de 20 años, haciendo acopio de dinero en efectivo y joyas, y convirtiéndose en un experto en boxeo y artes marciales. En los últimos tiempos había sufrido ataques de pánico y pesadillas donde le perseguían, seguramente desencadenados por las noticias sobre la limpieza étnica en Bosnia.

Los padres de Joseph se habían conocido en un campo de desplazados tras sobrevivir varios años en Auschwitz, y luego emigraron a Estados Unidos, adonde llegaron sin un céntimo. Su padre trabajaba 14 horas al día y apenas hablaba, en especial de la guerra. Pero casi cada noche despertaba a su familia con alaridos de terror a causa de las pesadillas que sufría. Su madre no paraba de hablar de la guerra y, a la hora de dormir, le contaba vívidas historias sobre parientes a los que habían asesinado ante sus ojos. Estaba decidida a que su hijo tuviera éxito, y la exasperaba la decisión de Joseph de no casarse ni tener descendencia. «No sobreviví a Auschwitz para que mi propio hijo acabara con nuestro linaje», solía decir. «Tienes una responsabilidad, conmigo y con la historia.»

Acabamos conociendo a mucha gente como Joseph: hijos adultos de supervivientes del Holocausto que sufrían ansiedad, aflicción, culpa, relaciones disfuncionales e intrusiones de imágenes relacionadas con el genocidio nazi. Joseph tenía razón: había que estudiar a personas como él. Dado que quienes nos llamaban se estaban seleccionando a sí mismos (y, por lo tanto, constituían una muestra sesgada), decidimos evaluar a la descendencia de los supervivientes del Holocausto que habíamos estudiado poco antes en Cleveland. Los resultados fueron claros: sus hijos adultos tenían más probabilidades de sufrir trastornos de ansiedad y del estado del ánimo, así como TEPT. Además, muchos de esos descendientes también presentaban niveles bajos de cortisol, algo que ya habíamos observado en sus progenitores con TEPT.

Lucha, huida o parálisis

¿Qué significaba todo aquello? Desde entonces, numerosos investigadores hemos tratado de aclarar la relación entre el trauma, el cortisol y el TEPT. Según la clásica respuesta «de lucha o huida», identificada en la década de 1920, las situaciones amenazantes hacen que liberemos hormonas del estrés, como la adrenalina y el cortisol. Estas sustancias provocan una cascada de cambios, como la aceleración del pulso y la agudización de los sentidos, que permiten a la persona o animal amenazado centrarse en el riesgo inmediato y reaccionar a él. Se pensaba que estos efectos agudos desaparecían al desvanecerse el peligro.

Sin embargo, en 1980, los psiquiatras y otros defensores de los derechos de los veteranos de la guerra de Vietnam lograron, tras una larga lucha, incluir el estrés postraumático en la tercera edición del *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales* (DSM-III), editado por la Asociación Americana de Psiquiatría [*véase* «La trampa del estrés postraumático», por David Dobbs; Investigación y Ciencia, junio de 2009]. Se trataba del primer reconocimiento oficial de que el trauma podía tener efectos duraderos. No obstante, el diagnóstico era controvertido: muchos psicólogos creían que la inclusión en el DSM-III respondía a motivos políticos, más que científicos (en parte, porque no existían expli-

caciones científicas sobre el modo en que una amenaza podía seguir afectando al organismo mucho después de disiparse).

Para colmo de males, los estudios con veteranos de Vietnam estaban arrojando resultados desconcertantes. A mediados de los ochenta, los neurocientíficos John Mason, Earl Giller y Thomas Kosten, de la Universidad Yale, hallaron que los veteranos con TEPT presentaban concentraciones altas de adrenalina, pero niveles más bajos de cortisol que los pacientes con otros diagnósticos psiquiátricos. Dado que el estrés suele provocar un aumento de las hormonas del estrés, entre ellas el cortisol, muchos científicos recibimos esos hallazgos con escepticismo. Un año más tarde, cuando me uní al laboratorio de Yale como investigadora posdoctoral, estudié un grupo distinto de veteranos, empleando otros métodos para medir el cortisol. Para mi asombro, obtuve los mismos resultados.

Seguía sin poder creer que los niveles bajos de cortisol guardaran relación con el trauma. El Holocausto, sin duda, había sido tan terrible como la guerra de Vietnam... y yo, que me había criado como la hija de un rabino en una comunidad llena de supervivientes del Holocausto, muchos de los cuales eran los padres de mis amigos, no había notado en ellos nada fuera de lo normal. Estaba segura de que no tenían TEPT ni déficit de cortisol, y se lo dije a Giller, que era mi supervisor. «Es una hipótesis comprobable», replicó. «¿Por qué no lo estudias, en vez de hacer conjeturas?»

Así que mi equipo de cinco personas se desplazó a Cleveland, con una centrifugadora y otros instrumentos. Nos instalamos en casa de mis padres. Durante el día íbamos puerta por puerta para realizar entrevistas, y por la noche volvíamos para analizar las muestras de sangre y orina. Los resultados evidenciaron de manera inequívoca que la mitad de los supervivientes del Holocausto sufrían TEPT, y quienes lo padecían presentaban concentraciones bajas de cortisol. Estaba claro: aunque la experiencia traumática hubiera sucedido tiempo atrás, el TEPT iba de la mano con los niveles bajos de cortisol.

Pero ¿por qué? ¿Y cuál de esas dos cosas ocurría antes? Una revisión realizada en 1984 por Allan Munck y otros investigadores de la Escuela de Medicina Geisel de Dartmouth proporcionó una pista importante. Observaron que, entre las hormonas del estrés, el cortisol desempeñaba un papel especial como regulador. Las concentraciones elevadas de hormonas del estrés, si se mantienen durante un período prolongado, afectan al organismo de varias formas: debilitan el sistema inmunitario y aumentan el riesgo de padecer problemas como la hipertensión. Sin embargo, en un contexto de trauma agudo, el cortisol también podría ejercer un efecto protector, ya que detiene la liberación de hormonas del estrés (incluido él mismo), minimizando así los posibles daños en los órganos y el cerebro. Podría ser que este bucle de retroalimentación provocado por el trauma restableciera el «termostato» de cortisol a niveles más bajos.

Coloqué otra de las piezas del rompecabezas. A principios de los noventa, habíamos mostrado que los veteranos de Vietnam tenían más probabilidades de desarrollar TEPT si habían sufrido abusos cuando eran niños. Poco a poco, iba emergiendo un patrón que conectaba la adversidad extrema durante la infancia (un período de «parálisis», porque, en general, los niños no pueden luchar ni huir) con los niveles bajos de cortisol y la posibilidad de padecer TEPT en el futuro. Estudiamos a personas que acudían a urgencias tras una violación o un accidente de tráfico, y hallamos que quienes producían menos cortisol tenían más tendencia a desarrollar TEPT a raíz de la agresión o el percance.

Me preguntaba si era posible que esas personas ya tuvieran niveles bajos de cortisol antes del suceso que las llevó a urgencias. Si en el momento de sufrir ese infortunio, razonamos, su concentración de cortisol era demasiado baja para sofocar la reacción de estrés, la adrenalina se dispararía y grabaría en el cerebro el recuerdo del nuevo trauma, desde donde podría resurgir más tarde en forma de reviviscencias o pesadillas. Quizá los niveles bajos de cortisol constituían un marcador de la propensión a desarrollar TEPT.

El estudio de la descendencia de los supervivientes del Holocausto confirmó esta conjetura. Los hijos de los supervivientes con TEPT tendían a mostrar niveles bajos de cortisol, aunque ellos mismos no sufrieran TEPT. Como sospechábamos, el déficit de cortisol parecía estar relacionado con la predisposición al TEPT.

El bucle de retroalimentación

Pero ¿qué mecanismo conectaba la exposición al trauma, los niveles bajos de cortisol y el futuro TEPT? Emprendimos una serie de estudios para responder a esa pregunta. Un hallazgo notable fue que los veteranos de Vietnam con TEPT poseían más receptores de glucocorticoides, unas proteínas

a las que se une el cortisol para ejercer sus efectos. Eso sugería una mayor sensibilidad al cortisol: un pequeño aumento en la concentración de la hormona provocaría una reacción fisiológica desproporcionada. Pero hasta que no analizamos con más detalle los fundamentos moleculares del funcionamiento del cortisol (en parte, examinando la epigenética), no comprendimos cómo la exposición al trauma podía restablecer el bucle de retroalimentación del cortisol.

La herencia epigenética quizá represente un intento del organismo por preparar a los hijos para desafíos similares a los que afrontaron sus padres

En los años noventa, los científicos estaban empezando a percatarse de que el producto de nuestros genes es sensible a factores que no están escritos directamente en nuestro código genético. Los genes proporcionan las plantillas para generar las proteínas. Sin embargo, del mismo modo que dos pasteles con los mismos ingredientes pueden quedar muy distintos en función de la temperatura del horno, la cantidad de esas proteínas que se produce, o «expresa», depende del ambiente. Ese descubrimiento dio origen a la epigenética, el estudio de los aspectos que influyen en la expresión génica y del modo en que lo hacen, que resultó crucial para comprender tanto los aspectos neurobiológicos del TEPT como los efectos intergeneracionales del trauma.

Los expertos en epigenética exploran los interruptores que encienden y apagan la expresión génica. Uno de estos mecanismos es la metilación, en la que interviene un grupo metilo (una molécula de metano a la que falta uno de sus cuatro átomos de hidrógeno, de manera que posee un electrón desapareado para formar un enlace con otro átomo o molécula). La metilación es un proceso por el cual, en presencia de determinadas enzimas, los grupos metilo se unen a puntos clave de una hebra de ADN o del complejo de ADN y proteínas conocido como cromatina [*véase* «Una herencia distinta», por Robin Holliday; Investigación y Ciencia, agosto de 1989]. Al ocupar estos lugares como si se tratara de barricadas en la autopista, los grupos metilo pueden alterar la transcripción, un paso básico de la expresión génica donde se crea un fragmento de ARN a partir de una plantilla de ADN. Por lo general, un aumento de la metilación inhibe la transcripción de ARN, mientras que una menor metilación la potencia. Estos cambios son duraderos, en el sentido de que sobreviven a la división celular normal y hacen falta enzimas concretas para revertirlos.

En 2015, nuestro grupo fue uno de los primeros en identificar cambios epigenéticos en los genes asociados al estrés de veteranos con TEPT. Dichas alteraciones explicaban, en parte, por qué los efectos del trauma eran tan persistentes y se alargaban durante decenios. En particular, observamos una menor metilación en una región importante de *NR3C1*, un gen que codifica los receptores de glucocorticoides, lo que probablemente aumentaba la sensibilidad de esos receptores.

Esa modificación epigenética sugiere una posible explicación de la forma en que el trauma puede restablecer los niveles de cortisol. El cuerpo regula la respuesta al estrés mediante un complejo mecanismo de retroalimentación: un aumento de la concentración de cortisol hará que el organismo produzca menos cantidad de la hormona, lo que podría elevar el número y la capacidad de respuesta de los receptores de glucocorticoides. Dados los cambios epigenéticos y de otra índole que tienen lugar en las respuestas sostenidas al trauma, el bucle de retroalimentación puede recalibrarse. Las personas que ya han sufrido traumas podrían tener sistemas de estrés sensibilizados y menores niveles de cortisol, lo que incrementaría la producción de adrenalina en traumas posteriores y conduciría al TEPT.

Herencia epigenética

¿Podría ser que algunos de esos cambios epigenéticos detectados en los supervivientes de un trauma se hallaran también en sus descendientes? En 2002, cuando detectamos niveles bajos de cortisol en los bebés del 11-S, comprendimos que nos habíamos estado planteando algunas cosas

de una forma equivocada. Habíamos asumido en todo momento que el trauma se transmitía a través del comportamiento: los problemas de Joseph parecían deberse a la atmósfera estresante y afligida del hogar donde creció. Pero ahora parecía que el ambiente uterino también desempeñaba una función, igual que el sexo del progenitor traumatizado.

En nuestros primeros trabajos sobre los descendientes de supervivientes del Holocausto, habíamos seleccionado solo a personas cuyos dos progenitores cumplieran esa condición. Repetimos los estudios para determinar si el sexo del progenitor era relevante... y resultó serlo. Aquellos cuya madre (o ambos padres) sufría TEPT tendían a presentar niveles más bajos de cortisol y mostraban indicios de poseer receptores de glucocorticoides más sensibles. En cambio, quienes tenían un padre, pero no madre, con TEPT exhibían el efecto opuesto.

Al analizarlo con más detalle, vimos de nuevo que los hijos de supervivientes del Holocausto con una madre (o ambos progenitores) afectada por TEPT presentaban una menor metilación en el gen de los receptores de glucocorticoides, *NR3C1*. Estos cambios reproducían lo que habíamos observado en las propias madres supervivientes. Sin embargo, en aquellos casos donde el padre era el único que sufría TEPT, detectamos el efecto opuesto: un aumento de la metilación. Tales hallazgos parecían indicar que el TEPT de un padre y el de una madre podían conducir a distintos cambios epigenéticos en los receptores de glucocorticoides de los hijos.

En una segunda serie de estudios iniciados en 2016, examinamos la metilación en otro gen, *FKBP5*, que codifica una proteína que ayuda a regular la capacidad de los receptores de glucocorticoides para unirse al cortisol. Descubrimos patrones de metilación similares tanto en los supervivientes del Holocausto como en sus descendientes. No obstante, dado el reducido número de sujetos en este estudio (por entonces ya resultaba difícil hallar supervivientes del Holocausto que pudieran participar con sus hijos), no logramos evaluar la forma en que podrían contribuir a la metilación de *FKBP5* factores como la presencia o no de TEPT en los progenitores.

Pese a todo, logramos reproducir y ampliar este trabajo con una muestra notablemente más grande, formada en exclusiva por hijos de supervivientes del Holocausto. En 2020, notificamos una menor metilación del gen *FKBP5* en los descendientes adultos cuya madre (pero no el padre) había estado expuesta al Holocausto durante la infancia; el efecto era independiente de si la madre sufría o no TEPT. Eso sugería que el trauma podría haber afectado a los óvulos maternos décadas antes de que concibieran a sus descendientes, cuando la propia madre aún era una niña.



Dadas las evidentes dificultades que entraña el estudio de distintas generaciones de personas, los científicos suelen recurrir a ensayos con animales para explorar la transmisión epigenética. En 2014, Brian Dias y Kerry Ressler, ambos de la Facultad de Medicina de la Universidad Emory, describieron una vía epigenética intergeneracional mediada por el esperma. Aplicaron a un ratón macho una leve descarga eléctrica mientras olía el aroma de la flor del cerezo, estimulando así una respuesta de miedo a dicho olor, que vino acompañada de cambios epigenéticos en el cerebro y el esperma del animal. Curiosamente, los machos engendrados por esos ratones mostraron un miedo similar a las flores del cerezo (así como cambios epigenéticos en el cerebro y el esperma) sin haber recibido descarga alguna. Esos efectos se transmitieron a lo largo de dos generaciones. En otras palabras, los hijos y nietos del ratón original recibieron como herencia la lección que había aprendido este: que la fragancia de la flor del cerezo anunciaba un peligro.

En un estudio reciente, experimentamos con la expresión génica a nivel de todo el genoma humano, una herramienta que permite identificar asociaciones entre la expresión de las proteínas y trastornos concretos. Usando este enfoque, volvimos a observar distintos patrones de expresión génica asociados a la exposición al trauma y al TEPT de la madre y del padre.

En el útero

Además de alterar los óvulos y los espermatozoides que contienen nuestra herencia genética, a veces décadas antes de la concepción, el trauma



DONALD R. ORNITZ/WIKIMEDIA COMMONS, DOMINIO PÚBLICO

LOS SUPERVIVIENTES del campo de concentración de Mauthausen saludan a las tropas estadounidenses que los liberaron, el 6 de mayo de 1945. Muchos de los estudios sobre la transmisión epigenética de los traumas se han realizado con supervivientes del Holocausto y sus descendientes.

también parece influir en el ambiente uterino. Algunos estudios minuciosos sobre los descendientes de mujeres que estaban embarazadas durante la Hambruna Holandesa (un período de seis meses de la Segunda Guerra Mundial durante el cual los nazis bloquearon el suministro de alimentos a los Países Bajos, lo que provocó una hambruna generalizada) aportaron los primeros indicios de esos efectos en el útero. Se descubrió que las secuelas del estrés extremo y la desnutrición, como las deficiencias en el metabolismo y la propensión a sufrir enfermedades cardiovasculares, dependían del trimestre del embarazo en que se hubiera producido la exposición.

Los bebés del 11-S también sufrieron un impacto en el útero, y los que se hallaban en el tercer trimestre mostraron niveles significativamente más bajos de cortisol. Por desgracia, nunca llegué a descubrir las implicaciones que ello tenía para su desarrollo futuro. En la visita de control, las madres con TEPT (y concentraciones bajas de cortisol) tenían más tendencia a referir que sus bebés de nueve meses mostraban una especial ansiedad y miedo a los desconocidos. Pero no obtuvimos financiación para hacer un seguimiento de los bebés hasta la edad adulta.

¿Cómo podía ser que el ambiente uterino dejara huellas del trauma en la descendencia? Nuestro trabajo con supervivientes del Holocausto y sus hijos adultos nos brindó algunas pistas. La historia vuelve a ser complicada, y en ella interviene una enzima denominada 11-beta-hidroxiesteroide deshidrogenasa de tipo 2 (11β-HSD2). Los supervivientes del Holocausto mostraban niveles más bajos de esa enzima que otras personas, y tales efectos eran especialmente acusados en quienes eran más jóvenes durante la Segunda Guerra Mundial. Esa enzima suele concentrarse en el hígado, los riñones y el cerebro. Sin embargo, en condiciones de privación de alimentos, el organismo puede reducir la cantidad de 11β-HSD2 para aumentar el combustible metabólico, con objeto de asegurar la supervivencia. Una vez concluya la inanición, los adultos recuperarán los niveles habituales de la enzima, pero en los niños es posible que permanezcan bajos. Nuestros hallazgos sugerían que los niveles de 11β-HSD2 podrían haberse visto alterados durante la in-

fancia, cuando los supervivientes del Holocausto sufrieron largos períodos de malnutrición; y ese cambio persistió hasta una edad avanzada.

En la descendencia de las mujeres que habían sobrevivido al Holocausto, sin embargo, detectamos justo lo contrario: los niveles de 11β-HSD2 eran mayores que los hallados en los sujetos judíos del grupo de referencia. Eso quizá parezca contradictorio, pero tiene su lógica. Durante el embarazo, la 11β-HSD2 también actúa en la placenta, y protege al feto de la exposición al cortisol materno circulante, que puede ser tóxico para el cerebro en desarrollo. La enzima, especialmente activa durante el tercer trimestre, convierte el cortisol materno en una forma inactiva, creando en la placenta una especie de escudo químico que resguarda al feto de los efectos perjudiciales de la hormona. Por tanto, las altas concentraciones de esta enzima en los hijos de las supervivientes del Holocausto podrían reflejar una adaptación, un intento de proteger al feto en vista de los menores niveles de 11β-HSD2 de sus madres.

Todo ello implica que los hijos no siempre son receptores pasivos de las cicatrices de sus padres. Igual que un progenitor logró sobrevivir al trauma por medio de adaptaciones biológicas, en ocasiones la descendencia puede adaptarse al impacto biológico del trauma sufrido por sus padres.

Por supuesto, la forma en que los padres traumatizados interactúan con sus hijos también afecta al desarrollo de estos. Una de las obras de no ficción más impactantes sobre la experiencia de crecer con padres supervivientes del Holocausto es la novela gráfica *Maus*, de Art Spiegelman; este relato publicado por entregas logró superar una barrera cultural y ayudó a otros a sincerarse sobre su sufrimiento. Muchos psicólogos y neurocientíficos han explorado el tema de la familia traumatizada, y siguen descubriendo aspectos cada vez más sutiles, así que esta historia seguirá escribiéndose durante decenios.

Una pregunta importante es si las alteraciones epigenéticas en genes relacionados con el estrés, en particular las que se manifiestan en la descendencia de progenitores traumatizados, constituyen marcadores de vulnerabilidad o podrían reflejar un mecanismo que equipa a los hijos para lidiar con la adversidad. Esta es un área que estamos investigando de manera activa.

Resulta tentador interpretar la herencia epigenética como una historia sobre cómo el trauma conlleva un daño permanente. Sin embargo, los efectos epigenéticos podrían representar los intentos del cuerpo por preparar a los hijos para desafíos similares a los que afrontaron sus progenitores. Conforme cambian las circunstancias, sin embargo, los beneficios de tales alteraciones pueden desvanecerse, o incluso transformarse en nuevas vulnerabilidades. Así pues, las ventajas para la supervivencia de esta forma de transmisión intergeneracional dependen en gran medida del entorno concreto al que se enfrenten los descendientes.

Además, algunos de estos cambios intergeneracionales asociados al estrés pueden ser reversibles. Hace varios años, descubrimos que los veteranos de guerra con TEPT que mejoraban gracias a la psicoterapia cognitivo-conductual mostraban cambios provocados por el tratamiento en la metilación del gen *FKBP5*. Este hallazgo confirmó que la curación también se manifiesta en cambios epigenéticos. Y Dias y Ressler volvieron a condicionar a sus ratones para que perdieran el miedo a las flores del cerezo; las crías concebidas después de este «tratamiento» no presentaban la alteración epigenética relacionada con esas flores, ni tenían miedo de su aroma. Aunque se trata de resultados preliminares, representan una frontera importante en psiquiatría y pueden inspirar nuevas vías de tratamiento.

Cabe esperar que, a medida que aprendamos más sobre la forma en que las experiencias catastróficas moldean tanto a quienes las viven como a sus descendientes, estaremos mejor preparados para abordar los peligros actuales y futuros, y para enfrentarnos a ellos con determinación y resiliencia.

Rachel Yehuda es profesora de psiquiatría y neurociencia, y directora del Centro de Investigación sobre Psicoterapia Psicodélica y Trauma de la Escuela de Medicina Icahn del Monte Sinaí, en Nueva York. También es directora de salud mental en el Centro Médico de Asuntos de Veteranos James J. Peters.



PARA SABER MÁS

Intergenerational transmission of stress in humans. Mallory Bowers y Rachel Yehuda en *Neuropsychopharmacology*, vol. 41, págs. 232-244, enero de 2016.

Intergenerational transmission of trauma effects: Putative role of epigenetic mechanisms. Rachel Yehuda y Amy Lehrner en *World Psychiatry*, vol.17, págs. 243-257, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El estrés deja su huella molecular. Eric J. Nestler en *MyC*, n.º 59, 2013.

Un nuevo tipo de herencia. Michael K. Skinner en *IyC*, octubre de 2014.

Experiencias heredadas. Ulrike Gebhardt en *MyC*, n.º 91, 2018.

La alargada sombra del trauma. Diana Kwon en *MyC*, n.º 114, 2022.

Recuerdos grabados en el genoma. Johannes Gräff en *MyC*, n.º 115, 2022.

BETALAÍNAS: LOS COLORANTES SALUDABLES

Unos pigmentos polifacéticos con aplicaciones en farmacología, la lucha contra el bioterrorismo y la detección de enfermedades

José Manuel López Nicolás

La gran competencia existente en la industria alimentaria obliga a sus departamentos de I+D+i a buscar nuevos ingredientes con una doble función: por una parte, deben tener propiedades organolépticas que atraigan al consumidor; por otra, deben ser saludables. Algunas moléculas candidatas a cumplir ambos requisitos son sintetizadas artificialmente —algo que no constituye ningún problema en sí, a pesar de lo que dicen ciertas campañas quimiofóbicas que rodean al *marketing* alimentario—; es el caso de algunos edulcorantes. Otras, en cambio, se encuentran de forma natural en plantas o alimentos, verdaderas factorías de compuestos con actividades biológicas muy interesantes desde el punto de vista de la promoción de la salud y también con propiedades gastronómicas muy atractivas. Dentro de este grupo de compuestos bioactivos de origen natural se han puesto muy de moda las betalaínas.

Las betalaínas son pigmentos nitrogenados singulares presentes en plantas del orden Cariofilales, que incluye familias como las Cactáceas o las Nictagináceas. En concreto, las encontramos en cactus, algunas flores (*Bougainvillea, Celosia, Gomphrena, Mirabilis, Portulaca*, etcétera), la remolacha y la quinua. Se dividen en dos grupos: las betacianinas, de color violeta (*kyanos*, significa «azul» en griego), y las betaxantinas, de color amarillo (*xanthos* es «amarillo» en griego).

Los estudios fisiológicos y bioquímicos de los últimos años han arrojado luz sobre la ruta de formación de las betalaínas en plantas. La transferencia de los genes implicados en esta ruta a bacterias o levaduras ha permitido el desarrollo de biofactorías que no dependen de la estacionalidad de las plantas, de su cultivo ni de la recogida de flores para la producción de las moléculas bioactivas. Además, se puede dirigir la síntesis hacia compuestos específicos o de nuevo diseño.

La principal propiedad de las betalaínas reside en su color, que se extiende desde el rojo-violeta hasta el amarillo. Se han propuesto una gran variedad de funciones para explicar la presencia de betalaínas en flores, incluida la atracción de animales que actuarían a modo de polinizadores y dispersadores de semillas. El ejemplo más conocido de planta superior con estos pigmentos corresponde a la raíz de la remolacha roja (*Beta vulgaris*); sin embargo, estos no desempeñan allí ninguna función visual, sino de regulación osmótica y de almacenaje de compuestos nitrogenados.

La intensidad de color de las betalaínas, junto con su estabilidad y demostrada inocuidad incluso a altas concentraciones, ha provocado que los extractos de remolacha roja sean utilizados por la industria alimentaria como colorantes en comidas y bebidas. Así, bajo la denominación E-162, aparecen en productos lácteos, helados, carnes, repostería y zumos.

Además de su papel como colorantes, las betalaínas son pigmentos vegetales que cuentan con una intensa actividad biológica basada en un


CORTESÍA DEL AUTOR

La flor de dompedro (*Mirabilis jalapa*) contiene unas betalaínas que pueden usarse para detectar la presencia de esporas de *Bacillus anthracis*, la bacteria responsable del carbunco (*anthrax* en inglés).

marcado carácter fitoquímico, una potente capacidad antioxidante y de eliminación de radicales libres, y un potencial efecto promotor de la salud in vitro e in vivo. Ello se basa en la actividad antioxidante de su unidad estructural, el ácido betalámico. Diferentes trabajos realizados con líneas celulares tumorales indican un posible papel de las betalaínas en la quimioprevención de algunos tipos de cánceres. En otros estudios in vivo se han añadido betalaínas a la dieta de ratones, ratas y gusanos, y se ha observado una reducción de la progresión de tumores inducidos por diferentes métodos.

Todos estos estudios relacionados con la doble función que comentábamos al inicio del artículo (sensorial y funcional) justifican que las betalaínas estén comenzando a utilizarse como ingredientes de nuevos productos alimentarios. Pero las aplicaciones de estas biomoléculas no se limitan a la comida. Su carácter polifacético está siendo usado en distintas áreas de conocimiento. Veamos algunos ejemplos.

Gracias a la fluorescencia de algunas betalaínas, se han diseñado sondas especiales con capacidad de penetrar en los glóbulos rojos infectados por un protozoo parásito que causa malaria en humanos. Como dichas sondas no pueden penetrar ni fluorescer en eritrocitos sanos, la presencia de fluorescencia constituye una señal de infección por malaria. Este método cada vez es más usado para detectar esta enfermedad.

Por otra parte, gracias al color de las betalaínas, se están diseñando estrategias para combatir el bioterrorismo. Algunas betalaínas forman una



CORTESÍA DEL AUTOR



La principal propiedad de las betalaínas reside en su color, que se extiende desde el rojo-violeta (betacianinas) hasta el amarillo (betaxantinas). Ofrecen así una extensa paleta crómatica (*arriba*, en polvo; *a la izquierda*, en dilución).

disolución acuosa de color naranja si les acoplamos iones europio (un elemento del grupo de los lantánidos). Pues bien, en presencia de un compuesto presente en las esporas de *Bacillus anthracis*, la bacteria responsable del carbunco (*anthrax* en inglés), el color naranja de esa disolución pasa a magenta. Si hay sospechas de que un sobre contiene *B. anthracis*, solo hay que ponerlo junto a nuestras betalaínas con europio y esperar a ver si estas cambian de color. Si es así, recomiendo alejarse del sobre.

Otra de las aplicaciones de las betalaínas la encontramos en la farmacología. Ello se debe a su potencial para inhibir la acción de dos enzimas: la ciclooxigenasa (COX) y la lipoxigenasa (LOX). La primera es responsable de la formación de unos importantes mediadores biológicos llamados prostanoides, entre los que se incluyen prostaglandinas, prostaciclinas y tromboxanos. La formación de prostaglandinas catalizada por COX es de gran interés biomédico, ya que estos compuestos guardan relación con el dolor, la inflamación y el desarrollo de neoplasias. Por otra parte, la función de LOX es transformar ácidos grasos (como el araquidónico) en leucotrienos, moléculas que participan en los procesos de inflamación crónica. Pues bien, estudios recientes muestran que las betalaínas son capaces de inhibir dichas enzimas, por lo que podrían emplearse en el desarrollo de fármacos destinados a mejorar la actividad inflamatoria.

No pierdan de vista a las betalaínas, unos de los compuestos bioactivos más prometedores existentes en la naturaleza.

José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.



EN NUESTRO ARCHIVO

Flores fluorescentes. Francisco García Carmona, Fernando Gandía Herrero y Josefa Escribano *IyC*, abril de 2011.

Betalaínas: colorantes naturales bioactivos. José A. Fernández López y Pedro J. Giménez en *IyC*, octubre de 2013.

EL PADRE DE TODOS LOS DADOS

El gömböc, una forma tridimensional descubierta a principios de siglo, presenta sorprendentes propiedades de equilibrio

Bartolo Luque

Gracias a las simetrías que presentan sus caras, cualquiera de los cinco sólidos platónicos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro) puede emplearse como dado, aunque el cubo es, sin duda, la opción más popular. Eso se debe a que resulta fácil de fabricar, rueda bien y proporciona una cantidad ni muy grande ni muy pequeña de números aleatorios.

Para entender cómo funciona un dado, debemos introducir algunos conceptos relacionados con el equilibrio. El centro de gravedad de un cuerpo es el punto respecto al cual las fuerzas de gravedad ejercidas sobre los distintos puntos de ese cuerpo producen un momento total nulo. (El momento mide la tendencia de una fuerza a hacer rotar un cuerpo.) En la práctica, eso nos permite suponer que todo el peso del cuerpo se concentra en el centro de gravedad. Y, en el caso de los sólidos platónicos, el centro de gravedad siempre coincide con el centro geométrico.

Si lanzamos cualquiera de los cinco dados platónicos sobre una superficie horizontal, acabará deteniéndose en una de sus posiciones de equilibrio estable. Ese «estable» significa que, si lo golpeamos suavemente, no se volteará, sino que regresará a la misma posición de equilibrio. Sin embargo, si el golpe es lo bastante fuerte para que la vertical que pasa por el centro de gravedad caiga fuera de la superficie de apoyo del cuerpo,



El gömböc es un cuerpo tridimensional homogéneo y convexo con solo dos puntos de equilibrio, uno estable y otro inestable. Su existencia fue propuesta en 1995 y demostrada en 2006.

DOMOKOS/WIKIMEDIA COMMONS, DOMINIO PÚBLICO

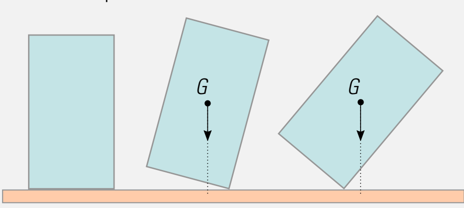


SHARKD/WIKIPEDIA COMMONS, CC BY-SA 3.0

1. DADOS PLATÓNICOS. Todos los sólidos platónicos pueden servir como dados, aunque el cubo sea la forma más habitual. El tetraedro, formado por cuatro caras triangulares, no se usa mucho porque apenas rueda y solo proporciona cuatro números al azar. El octaedro, con ocho caras triangulares, se ha hallado en tumbas egipcias, mientras que el dodecaedro, de doce caras pentagonales, y el icosaedro, de veinte caras triangulares, se empleaban antaño para echar la buenaventura. Hoy podemos encontrar estos dados en muchos juegos de rol.

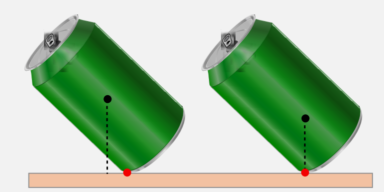
Equilibrios imposibles

Supongamos un cuerpo que se halla en equilibrio estable sobre una superficie horizontal:



Si lo inclinamos ligeramente volverá a la posición inicial (*centro*). Si lo inclinamos tanto que la vertical que pasa por el centro de gravedad *G* cae fuera de la superficie de contacto, el cuerpo se moverá a otra posición de equilibrio.

Podemos aumentar la estabilidad de un cuerpo bajando su centro de gravedad. Esa es la base de un sencillo truco que podemos realizar en casa con una lata de refresco.



Si inclinamos la lata cuando está llena (*izquierda*), no podrá mantenerse en equilibrio, porque la vertical que pasa por su centro de gravedad cae fuera del punto de apoyo (*punto rojo*). Sin embargo, según vamos vaciando la lata, su centro de gravedad baja más y más. Si volvemos a inclinarla tras beber unos dos tercios del contenido (*derecha*), la vertical caerá dentro de la pequeña superficie de contacto y la lata permanecerá estable como por arte de magia.



este sufrirá un momento neto no nulo y se moverá a un nuevo punto de equilibrio estable. (Como veremos más adelante, también hay posiciones de equilibrio «inestable» que no admiten la más mínima perturbación, pero un dado nunca aterrizará en una de ellas.)

Un orbe con dos equilibrios

Si la densidad del dado es homogénea, todas sus caras tendrán la misma probabilidad de ser la base sobre la que acaba asentándose. Pero es posible trucar el dado (es decir, romper su simetría) colocando pequeños pesos metálicos en una de sus caras o ahuecándolo adecuadamente. En ambos casos, estamos haciendo que el cuerpo deje de ser homogéneo y desplazando su centro de gravedad, para convertirlo en una especie de tentetieso.

Un tentetieso es, en esencia, una esfera con uno de sus hemisferios mucho más pesado que el otro. El centro de gravedad de una esfera homogénea también coincide con su centro geométrico y, si dejamos que la esfera repose sobre una superficie plana, el centro de gravedad y el punto de contacto formarán una línea perpendicular a la superficie.

En el tentetieso, sin embargo, la inhomogeneidad desplaza el centro de gravedad. En la posición de equilibrio, el centro de gravedad y el punto de contacto vuelven a formar una línea perpendicular al suelo, pero ahora el centro de gravedad se halla más bajo, lo que confiere mayor estabilidad al tentetieso: si empujamos una esfera, rueda; pero al mover el tentetieso, su centro de gravedad se aleja de la perpendicular y aparece un momento neto que restituye el cuerpo a su posición de equilibrio. Por eso los niños pequeños tienen tanta facilidad para esquiar o los coches de carreras son tan bajos: sus centros de gravedad están más cerca del suelo y eso los hace más estables.

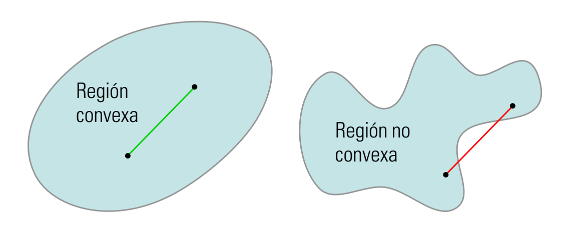
Si ponemos nuestro tentetieso esférico «al revés», con la parte más pesada arriba, en teoría también quedará en equilibrio. Pero este será inestable y se perderá ante la menor perturbación externa. En la práctica, el tentetieso se volteará y retornará a su posición de equilibrio estable.

Así pues, tal tentetieso tiene una posición de equilibrio estable y otra inestable. Nuestros dados platónicos homogéneos poseen tantos puntos de equilibrio estables como caras y tantos inestables como vértices. El tetraedro, con cuatro puntos de equilibrio estables y cuatro inestables, presenta

el menor número de puntos de equilibrio de los cinco dados platónicos.

¿Existen dados con menos puntos de equilibrio? En 1995, el matemático Vladímir Ígorevich Arnold se preguntó si existía un cuerpo homogéneo y convexo que poseyera solo dos de esos puntos, uno estable y otro inestable. Si usáramos un cuerpo así como dado, obtendríamos siempre el mismo resultado.

Vemos que, aparte de homogeneidad, Arnold exigía convexidad. ¿Qué significa eso? Una región C es convexa si podemos unir cualquier par de sus puntos mediante un segmento contenido en su totalidad en C. De modo que un cuerpo convexo no posee «huecos» (así, una bola es convexa, pero un anillo, no), y su superficie no presenta regiones «hundidas», sino que estas sobresalen hacia afuera o al menos son planas en cada punto, como muestra el siguiente ejemplo bidimensional:



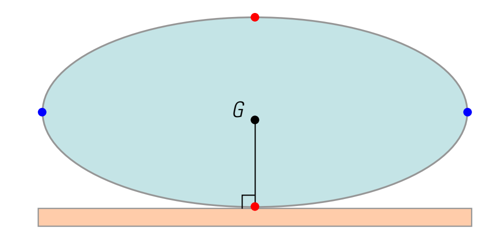
Observemos que todos los dados platónicos son convexos. El requisito de la convexidad es esencial, ya que, de otro modo, resulta trivial construir un cuerpo con un punto de equilibrio estable y otro inestable: por ejemplo, nuestro tentetieso esférico con un hemisferio ahuecado.

En 2006, el matemático Gábor Domokos y el arquitecto Péter Várkonyi no solo demostraron la existencia del cuerpo que buscaba Arnold, sino que lograron construirlo (*véase la imagen que abre el artículo*). Lo bautizaron con la palabra húngara *gömböc*, un diminutivo de «esfera». Cuando lanzamos un dado con forma de gömböc, acaba siempre en su única posición de equilibrio estable. La primera vez que una amiga me enseñó uno, pensé que me hallaba frente a un tentetieso o algún truco similar. Cuando mi amiga lo desmintió, me quedé perplejo... y es que, por un momento, el gömböc parece tener vida propia.

¿Un gömböc bidimensional?

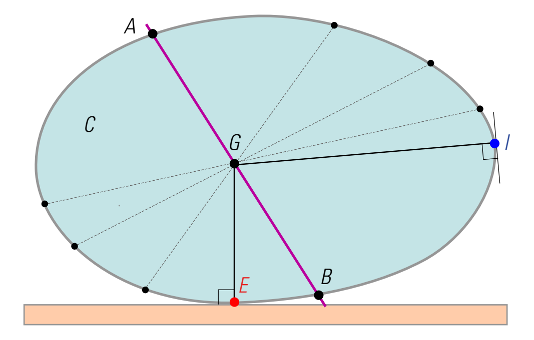
Así pues, un gömböc es un cuerpo tridimensional convexo y homogéneo que, al descansar sobre una superficie plana, presenta solo un punto de equilibrio estable y otro inestable. Algo que ya sabían los matemáticos desde hace tiempo es que no existe un gömböc en dos dimensiones: una región convexa del plano no puede tener exactamente dos posiciones de equilibrio, una estable y otra inestable, sino que debe poseer más. ¿Cómo podríamos demostrarlo?

Comencemos pensando en una elipse metálica, que es una región convexa bidimensional:

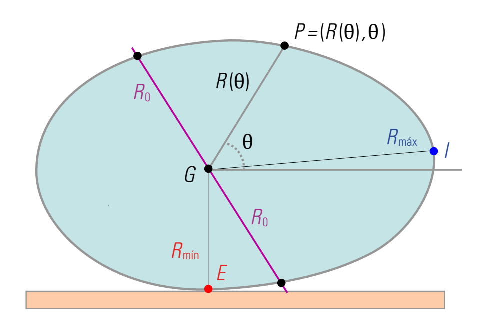


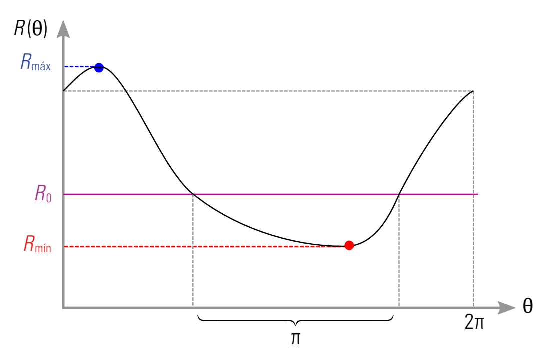
Su centro de gravedad G coincide con su centro geométrico. En el dibujo, la elipse se apoya sobre uno de sus dos puntos estables (*en rojo*), de modo que la línea que une G con el punto de contacto es perpendicular a la horizontal. De hecho, esta es la mínima distancia de un punto del borde al centro de gravedad. Si perturbamos levemente el cuerpo, regresará a su posición de equilibrio. Sin embargo, los dos puntos de equilibrio inestables (*en azul*) no admiten perturbación alguna: cuando la elipse se apoya sobre ellos, cualquier pequeño empujón la hará rodar. Los puntos de equilibrio inestable son justo los que se encuentran a mayor distancia del centro de gravedad.

Consideremos ahora un cuerpo bidimensional arbitrario, convexo y de densidad homogénea, al que llamaremos C:



La homogeneidad implica que la masa de un trozo de C es proporcional a su área, con la densidad como constante de proporcionalidad. Como C es convexo, su centro de gravedad G se hallará en su interior (en el caso de un cuerpo con huecos, como una rosquilla, el centro de gravedad puede estar fuera del cuerpo). Supongamos que C tiene solo dos puntos de equilibrio, denotados en la figura anterior como E e I. Si apoyamos





2. DESCRIPCIÓN EN COORDENADAS POLARES de los puntos del contorno de una región convexa y dibujo cualitativo de la función continua $R(\theta)$, que representa la distancia de esos puntos al centro de gravedad. El mínimo y el máximo de $R(\theta)$ corresponden a los puntos de equilibrio estable e inestable, respectivamente.

el cuerpo sobre cualquiera de estos puntos, de manera que la línea tangente quede horizontal, el cuerpo permanecerá en reposo.

Reparemos en que la distancia entre un punto del contorno de nuestro cuerpo y el centro de gravedad *G* disminuye conforme nos aproximamos a *E*. Allí la distancia es mínima, lo que indica que *E* es un punto de equilibrio estable. En cambio, a medida que nos alejamos de *E* y nos acercamos a *I*, la distancia se va haciendo cada vez mayor, hasta tornarse máxima en *I*, un punto de equilibrio que, por lo tanto, debe ser inestable. Un razonamiento similar nos lleva a concluir que si *C* presenta *n* puntos de equilibrio estables, también tendrá *n* inestables.

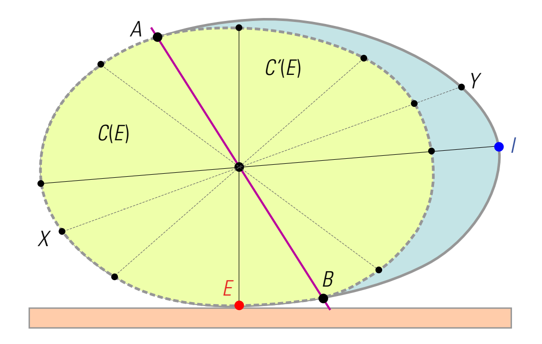
Ahora veremos que el número mínimo de puntos de equilibrio que puede tener *C* es cuatro: dos estables y dos inestables, como en el caso de una elipse. Para ello usaremos la reducción al absurdo: supondremos que *C* tiene únicamente un punto de equilibrio estable *E* y otro inestable *I*, y demostraremos que eso conduce a una contradicción.

Toda recta que pasa por *G* corta al borde de *C* en dos puntos, *A* y *B*. Como podemos apreciar en la figura anterior, cuando *A* está próximo al punto de equilibrio inestable *I*, la diferencia de distancias $|GA| - |GB|$ es positiva, porque $|GA|$ está cerca de la máxima distancia posible, $|GI|$. En cambio, cuando *A* está próximo al punto de equilibrio estable *E*, $|GA| - |GB| < 0$ porque ahora $|GA|$ está cerca de la distancia mínima, $|GE|$. Así, a medida que rotamos la recta que pasa por *G*, la diferencia de distancias $|GA| - |GB|$ cambia de signo, por lo que hay una línea para la cual $|GA| - |GB| = 0$, es decir, tal que las distancias cumplen $|GA| = |GB| = R_0$ (*la recta morada de la figura anterior*).

Para arrojar un poco de luz analítica sobre la cuestión, podemos representar cualquier punto *P* del contorno de *C* como un par ordenado (R, θ) en coordenadas polares, tomando como origen el centro de gravedad *G* (*véase la figura 2*). En ese caso, *R* representa la distancia de *P* al origen y θ es el ángulo entre el segmento *GP* y la horizontal, el cual crece en sentido antihorario. De este modo, todo el contorno de *C* queda descrito por una función $R(\theta)$.

El punto de equilibrio estable *E* es el punto del contorno que se encuentra a la distancia mínima ($R_{mín}$) de *G*, y el punto de equilibrio inestable *I*, el que se halla a la distancia máxima ($R_{máx}$). Así que la función $R(\theta)$ alcanza su mínimo en *E* y su máximo en *I*. En coordenadas polares, los puntos *A* y *B* tales que $|GA| = |GB| = R_0$ son $A = (R_0, \theta_0)$ y $B = (R_0, \theta_0 + \pi)$, y su existencia queda asegurada por la continuidad de $R(\theta)$ y la presencia de sus dos puntos extremos *E* e *I*.

Advirtamos que la recta *AB* divide la región *C* en dos partes: una que contiene a *E* y que denotaremos como $C(E)$, y otra que contiene a *I* y que llamaremos $C(I)$. Como podemos apreciar en la siguiente figura, cualquier recta que pase por *G* tendrá un punto de corte *X* en $C(E)$ y otro *Y* en $C(I)$, y siempre ocurrirá que $|GX| < |GY|$.



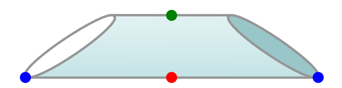
Eso implica que la imagen simétrica $C'(E)$ de $C(E)$ con respecto al centro de gravedad *G* está conteni-

da en $C(I)$, y la unión U de $C(E)$ y $C'(E)$ (*la región sombreada en amarillo*) está totalmente contenida en C. Pero G es el centro de simetría, y por tanto de gravedad, de esa región U. Dado que C está formada por U y la medialuna de la derecha (*sombreada en cian*), su verdadero centro de gravedad debería estar a la derecha de G, en el interior de $C(I)$. Esta contradicción muestra que una región plana convexa C no puede tener solo dos puntos de equilibrio.

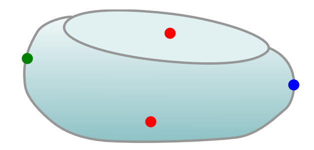
El caso tridimensional

La sorprendente conclusión dinámico-física a la que hemos llegado es el equivalente del teorema de los cuatro vértices, un resultado matemático que afirma que la curvatura de una curva plana simple y cerrada alcanza al menos cuatro valores extremos (dos máximos y dos mínimos).

Sin embargo, el argumento que hemos empleado para cuerpos planos no funciona con formas tridimensionales, donde tendríamos que usar un sistema de coordenadas esféricas $R(\phi,\theta)$ con origen en el centro de gravedad G. En este caso, los máximos y mínimos locales de $R(\phi,\theta)$ también corresponden a puntos de equilibrio estables (cuyo número denotaremos por e) e inestables (i), pero un sólido tridimensional también puede presentar otro tipo de puntos de equilibrio que no aparecen en dos dimensiones, los denominados «puntos de silla» (s). Por ejemplo, el siguiente cuerpo



posee un punto de equilibrio estable ($e = 1$, *rojo*), dos inestables ($i = 2$, *azul*) y un punto de silla ($s = 1$, *verde*), mientras que este otro



(que sería una especie de rueda de coche sólida) presenta $e = 2$, $i = 1$ y $s = 1$.

El número de puntos de equilibrio de cada tipo que hay en un cuerpo homogéneo y convexo queda fijado por la relación

$$e + i - s = 2,$$

conocida como teorema de Poincaré-Hopf. Así que la pregunta de Arnold se puede reformular del siguiente modo: ¿existe un cuerpo convexo y homogéneo con $e = i = 1$ (un punto de equilibrio estable y otro inestable) y, por lo tanto, con $s = 0$ (sin puntos de silla)?

Intentemos usar la misma estrategia que en el caso plano para demostrar que no existe tal cuerpo. Si existiera, $R(\phi,\theta)$ tendría un solo máximo y mínimo locales. Entonces, el cuerpo podría dividirse en dos partes por medio de una superficie plana, y la intersección de esta con la superficie frontera de C definiría una curva cuyos puntos cumplirían $R = R_0$. Si esa curva fuera siempre plana (como una elipse, por ejemplo), llegaríamos a una contradicción similar a la del caso bidimensional. Sin embargo, en un sólido, dicha curva puede ser «alabeada», como la costura que recorre la superficie de una pelota de tenis, y esa posibilidad inhabilita la prueba.

Finalmente, Domokos y Várkonyi lograron demostrar la existencia del cuerpo propuesto por Arnold, proporcionando incluso una expresión con dos parámetros que muestra que hay infinidad de formas que cumplen el requisito. Por desgracia, la convexidad hacía que esas formas siempre fueran casi indistinguibles de una esfera. Sin embargo, el hándicap de las curvas alabeadas acabó siendo la pista para dar con un gömböc muy distinto a una esfera (como el que abre esta columna), formado a partir de la intersección de cuerpos simples como el cilindro, el elipsoide y el cono.

El padre de todos los dados

Podemos clasificar los sólidos convexos en función de su número de puntos de equilibrio estables (e) e inestables (i) cuando reposa sobre una superficie horizontal. Por ejemplo, el dado con forma de tetraedro regular es de clase $(e,i) = (4,4)$ porque descansa en equilibrio estable sobre cualquiera de sus 4 caras e inestable sobre cualquiera de sus 4 vértices. Entonces, según el teorema de Poincaré-Hopf,

$$s = 4 + 4 - 2 = 6,$$

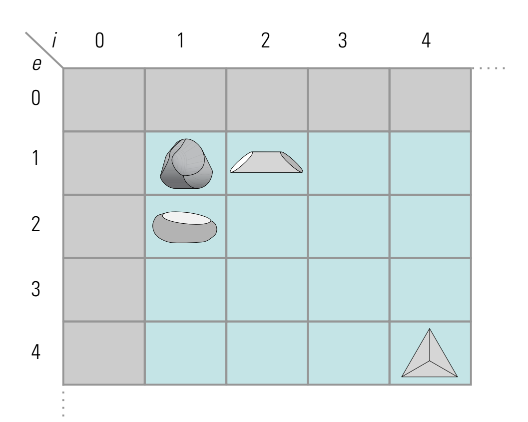
y el tetraedro tendrá 6 puntos de silla, que corresponden a los puntos medios de las seis aristas. Para el clásico dado cúbico, tenemos $(e,i) = (6,8)$, ya que descansa de manera estable sobre cualquiera de sus 6 caras e inestable sobre cualquiera de sus 8 vértices, de modo que

$$s = 6 + 8 - 2 = 12.$$



4. GÖMBÖCS NATURALES: Ciertos galápagos, como la tortuga estrellada de la India (*Geochelone elegans*), poseen caparazones con una forma que recuerda a la del gömböc. Eso les permite rodar y enderezarse fácilmente tras un vuelco accidental.

Es decir, que posee 12 puntos de silla, situados en sus 12 aristas. Domokos se tomó la molestia de estudiar cientos de guijarros de playa, y determinó que la mayoría pertenece a la clase (2,2). Con toda esta información, podemos ir creando una tabla, en la que el gömböc ocupa la casilla correspondiente a la clase (1,1).

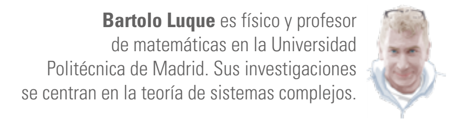


Es probable que el lector conozca la historia del huevo de Colón. Al parecer, durante una comida, el famoso descubridor retó a los asistentes a poner un huevo en pie sobre la superficie de una mesa. Cuando todos se dieron por vencidos, Colón aplanó con un suave golpe un extremo del huevo y logró así que se mantuviera en equilibrio.

Los matemáticos actúan de forma análoga: perturban localmente la superficie de los cuerpos para añadir puntos de equilibrio estables o inestables. Por ejemplo, si recortamos de manera adecuada el vértice de un tetraedro, podemos lograr que se mantenga estable sobre ese extremo. Ese procedimiento nos permite transformar los cuerpos y moverlos hacia la derecha y hacia abajo en la tabla anterior. El procedimiento «inverso», sin embargo, no permite reducir el número de puntos de equilibrio. Así pues, al estar situado en la esquina superior izquierda de la tabla, el gömböc se distingue por ser el único cuerpo que puede adquirir cualquier número de puntos de equilibrio estables e inestables mediante alteraciones de su superficie. Por eso, en cierto modo, el gömböc es el padre de todos los dados.

Domokos y Várkonyi intentaron hallar gömböcs en la naturaleza. Como ya hemos visto, los buscaron con denuedo entre las piedras de la playa, pero todos sus esfuerzos fueron en vano. Si había alguna piedra con forma de gömböc, su existencia debía ser efímera, dado que cualquier pequeño cambio destruiría sus singulares propiedades. ¿Cómo podría sobrevivir una forma tan precisa a los efectos de la erosión?

Quizás debían mirar en otro sitio. Si la evolución pudiera sacar partido del gömböc, seguro que habría preservado su forma, así que decidieron centrarse en las «conchas de la playa». Y así fue como descubrieron que ciertas tortugas poseen caparazones con una forma similar a la del gömböc con el que hemos estado jugando. Y eso les confiere una gran ventaja: les permite volver fácilmente a su posición de equilibrio tras un vuelco accidental. De este modo, la tortuga de Aquiles hizo otra memorable irrupción en el mundo de las matemáticas.


Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

PARA SABER MÁS

https://gomboc.eu Sitio web dedicado al gömböc.

Equilibria of rigid bodies: Dice, pebbles, and the Poincaré-Hopf theorem. Péter L. Várkonyi y Gábor Domokos en *Journal of Nonlinear Science*, vol. 16, págs. 255-281, junio de 2006.

My lunch with Arnold. Gábor Domokos en *The Mathematical Intelligencer*, vol. 28, págs. 31-33, septiembre de 2006.

Mono-monostatic bodies: The answer to Arnold's question. Péter L. Várkonyi y Gábor Domokos en *The Mathematical Intelligencer*, vol. 28, págs. 34-38, septiembre de 2006.

Geometry and self-righting of turtles. Gábor Domokos y Péter L. Várkonyi en *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 275, págs. 11-17, enero de 2008.

La gömböc. Serge Cantat en *Images des Mathématiques*. CNRS, 5 de abril de 2014.

O gömböc: Um brinquedo do século XXI. José Carlos Santos en *Gazeta de Matemática*, vol. 193, pág. 23, marzo de 2021.

LIBROS

INTERPRETACIONES CUÁNTICAS INNECESARIAS

Carlo Rovelli y su visión relacional de la mecánica cuántica



Helgoland
Carlo Rovelli
Anagrama, 2022
216 páginas

Carlo Rovelli es profesor de física teórica en la Universidad de Aix-Marsella y uno de los mayores expertos mundiales en gravedad cuántica de bucles, una de las principales alternativas a la teoría de cuerdas como teoría cuántica de la gravedad. También es un prolífico escritor y divulgador científico. En 1996, publicó un artículo de investigación titulado «Mecánica cuántica relacional», con el que se adentró en el siempre atractivo, pero pantanoso, terreno de las «interpretaciones de la mecánica cuántica». Y ese es el tema central de su último libro, *Helgoland*.

No está muy claro por qué tendríamos que interpretar la mecánica cuántica, y no las leyes de Newton o los principios de la termodinámica. Sin embargo, Rovelli se adhiere aquí, usando los argumentos habituales (la famosa *boutade* de Richard Feynman o el debate Bohr-Einstein, que muchos creen, erróneamente, aún abierto), a esa corriente según la cual los físicos no entendemos la mecánica cuántica. Hay quien propone que la clave para descifrarla se encuentra en los «muchos mundos» de Everett o la teoría de Bohm, enfoques certeramente criticados por Rovelli. Según él, en cambio, la piedra de Rosetta que debería hacernos caer del caballo es la comprensión del carácter «relacional» de la naturaleza.

Los experimentos basados en la violación de las desigualdades de Bell han mostrado de manera concluyente que los sistemas cuánticos no poseen propiedades bien definidas hasta que se realiza una medición. En palabras de Niels Bohr, confirmadas en el laboratorio, «la descripción no ambigua de un fenómeno cuántico requiere, en principio, incluir la descripción de todos los aspectos relevantes del dispositivo experimental». Esta es quizá la característica fundamental de la física cuántica. En términos relacionales, podemos decir que las propiedades de los sistemas cuánticos siempre están definidas con respecto a algo: el aparato de medida. (Evitemos la confusa terminología que alude al «observador», aunque no lo haga Rovelli.) Pero si, como admite el autor, la idea relacional ya se hallaba presente en los escritos de Bohr y otros padres fundadores de la física cuántica, ¿por qué necesitamos una nueva interpretación? Según Rovelli, ahora sabemos que «*toda* la naturaleza es cuántica y no existe nada especial en un laboratorio de física con un aparato de medición». Pero ese es justo el punto más débil de su discurso.

El mismo Rovelli, sin pretenderlo, nos explica por qué, cuando hace una muy oportuna crítica del uso de la física cuántica para justificar pseudociencias, pseudoterapias y misticismos varios: «el mundo es lo bastante complejo para dar cuenta de la magia de la música de Bach, de las buenas vibraciones y de nuestra profunda vida espiritual sin necesidad alguna de recurrir a rarezas cuánticas». Tiene toda la razón, pero ¿no habíamos quedado en que toda la naturaleza es cuántica? ¿No decía el autor que «los dispositivos que efectúan las mediciones, los científicos que los leen, los cuadernos en los que toman notas, los mensajes en los que escriben los resultados de la medición, *también son todos ellos objetos cuánticos*»?

No, no lo son. Rovelli nos cuenta que su amigo Lee (seguramente Lee Smolin), tras estudiar por primera vez el entrelazamiento, se había pasado horas tumbado «pensando que cada átomo de su cuerpo había interactuado en un pasado lejano con muchos átomos del universo. Así pues, cada átomo de su cuerpo tenía que estar conectado con miles de millones de otros átomos esparcidos por la galaxia... Se sentía mezclado con el cosmos». Rovelli da por bueno este comentario, cuando en realidad debería enmarcarse en el «increíble desfile de tonterías» de los misticismos cuánticos. La superposición cuántica, en la que se basa el entrelazamiento, es muy difícil de generar y de mantener, y desaparece enseguida en contacto con el entorno. Ninguno de los átomos del cuerpo del amigo Lee está ya entrelazado con nada del exterior.

Ese error se repite en toda la parte central del libro. Por más vueltas que le demos al célebre gato de Schrödinger (reconvertido aquí en gato de Rovelli, ya que solo estaría en un estado de superposición entre dormido y despierto: «No me gusta bromear con la muerte de un gato»), no basta con encerrar al felino en una caja con un elemento radiactivo para poner el sistema en una superposición cuántica. Y es que esta requeriría unas condiciones (de temperatura, por ejemplo) incompatibles con la existencia del gato. Schrödinger planteó ese ejemplo mental para subrayar lo ridículo de extender la superposición cuántica a objetos macroscópicos cotidianos, que es precisamente lo que hace Rovelli.

Es en su intento de mostrarnos cómo afectaría la interpretación relacional a nuestra visión macroscópica del mundo cuando la obra naufraga de forma más clara. Rovelli identifica cualquier correlación, como la existente entre la lectura de un termómetro y la temperatura exterior, con el entrelazamiento. Pero el entrelazamiento cuántico es un vínculo especial que va más allá de las «correlaciones clásicas», como la del termómetro. Ese razonamiento le lleva al disparate: si miro una mariposa y veo el color de sus alas, estoy en un estado entrelazado con la mariposa y «no es imposible que se den sutiles fenómenos de interferencia con la configuración donde la mariposa era de otro color». No. Es ciertamente imposible porque no hay ninguna superposición cuántica, ningún entrelazamiento ni ninguna interferencia: solo correlaciones clásicas.

Obviamente, Rovelli no ignora (porque menciona la decoherencia cuántica) que los objetos «clásicos» de nuestra vida diaria no están en estado de superposición. Sin embargo, parece creer que los efectos cuánticos siguen ahí, aunque no sea posible medirlos. Por un lado, eso no es cierto: por ejemplo, el entrelazamiento desaparece (se hace cero, no muy pequeño) por debajo de un cierto valor umbral de superposición. Y, por otro, tal razonamiento contradice las ideas centrales de la interpretación relacional: ¿qué sería esa especie de esencia que no es relativa a nada, ni se relaciona con nada, ya que no se puede medir? ¿Todo es relacional salvo el hecho, indiscutible e inverificable, de que todo es cuántico?

Rovelli refiere una conversación con el filósofo David Albert, quien le pregunta: «Carlo, ¿cómo puedes pensar que experimentos hechos con trozos de metal y vidrio en el laboratorio puedan tener tanto peso como para cuestionar nuestras convicciones metafísicas más profundas acerca de cómo es el mundo?». Rovelli replica: «¿Y cuáles son "nuestras convicciones metafísicas más profundas" sino *también estas*, solo algo que nos hemos acostumbrado a creer verdadero, precisamente manipulando piedras y trozos de madera?». No es mala contestación, pero elude el punto principal, que yo plantearía así: ¿por qué los experimentos con objetos que siguen leyes cuánticas deberían afectar a nuestra comprensión de objetos que no se rigen por esas leyes? La intención de este libro (que saquemos todo tipo de conclusiones filosóficas a partir de la interpretación relacional de la física cuántica) fracasa si no damos respuesta a esa pregunta.

Rovelli es, sin duda, un buen escritor y una persona culta, dos rasgos que le distinguen de muchos de sus colegas. Disfrutamos con sus referencias a Robert Musil, Luigi Pirandello o Shakespeare, que van apareciendo de manera natural en este libro, como en todos los suyos. Le perdonamos sus divagaciones sobre el revolucionario soviético Aleksandr Bogdánov y el filósofo indio Nāgārjuna. Nos gusta imaginárnoslo tomando té en Ontario, mientras acaricia a su gato y fuera cae la nieve. Pero aquí, entre la niebla de Helgoland, se desvía «de su camino un cuarto de legua para correr en pos de una agudeza», como diría Montaigne. Tal vez la mecánica cuántica no necesitaba de tanta interpretación y sí de una mejor explicación, una que evite la confusión con la física clásica.

Carlos Sabín
Departamento de Física Teórica
Universidad Autónoma de Madrid